

**AALTO-YLIOPISTON TEKNILLINEN KORKEAKOULU**

Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

Koneenrakennustekniikan laitos

Jaani Hyytiäinen

**Taajuusmuuttajan mekaniikkasuunnittelun  
luotettavuustyökalut**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten

Espoo 8.10.2010

Työn valvoja: Professori Petri Kuosmanen

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Mikael Aulanko

AALTO-YLIOPISTO TEKNILLINEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 Aalto <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Jaani Hyytiäinen			
Työn nimi: Taajuusmuuttajan mekaniikkasuunnittelun luotettavuustyökalut			
Tiedekunta: Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta			
Laitos: Koneenrakennustekniikan laitos			
Professori: Koneensuunnitteluoppi		Koodi: Kon-41	
Työn valvoja: Professori Petri Kuosmanen Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Mikael Aulanko			
<p>Tuuliturbiineilta odotetaan suurta käytettävyyttä ja luotettavuutta, minkä takia myös sen komponenttien täytyy olla luotettavia. Työn tarkoitus oli tutustua luotettavuuteen ja tutkia luotettavuustyökaluja, joita voidaan käyttää tuulivoimaan tarkoitettujen taajuusmuuttajien mekaniikkasuunnittelussa. Tavoitteena oli myös löytää sopiva vaihe suunnitteluprosessista näiden työkalujen käytölle.</p> <p>Työn alussa tutustutaan yleisesti luotettavuuteen ja erilaisiin laadullisiin ja puoli-määrällisiin luotettavuustyökaluihin, joita voidaan käyttää tuotekehityksessä. Työssä tutkittiin syy-seuraus-analyysiä, vika- ja vaikutusanalyysiä ja vikapuuanalyysiä. Analyysit tehtiin kahdelle eri projektille, jotka olivat eri vaiheessa tuotekehitysprosessia.</p> <p>Tulosten perusteella syy-seuraus-analyysi soveltuu hyvin aloittamaan luotettavuusanalyysin. Tällä analyysillä saadaan avattua suunnittelijoiden ajatukset. Perusteellinen luotettavuusanalyysi on hyvä tehdä vika- ja vaikutusanalyysinä. Vikapuuanalyysi soveltuu paremmin monimutkaisemmille vioille kuin mitä tutkimuksessa löydettiin. Tutkimuksen luotettavuustyökaluja voidaan käyttää konseptienvertailussa ja ennen prototyypin valmistamista tutkimaan tuotteen luotettavuutta. Tehtyjä analyysejä voidaan päivittää pitkin tuotekehitysprosessia käyttökokemusten perusteella. Luotettavuutta voidaan myös lisätä käyttämällä suunnittelussa tarkistuslistaa vanhoista vioista.</p>			
Päivämäärä: 8.10.2010		Kieli: suomi	
		Sivumäärä: 96	
Avainsanat: luotettavuus, syy-seuraus-analyysi, vika- ja vaikutusanalyysi, vikapuuanalyysi, taajuusmuuttaja, mekaniikkasuunnittelu, tuotekehitys			



AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PO Box 11000, FI-00076 AALTO <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Jaani Hyytiäinen			
Title: Reliability tools for frequency converter's mechanical designing			
Faculty: Faculty of Engineering and Architecture			
Department: Department of Engineering Design and Production			
Professorship: Machine Design		Code: Kon-41	
Supervisor: Professor Petri Kuosmanen Instructor: Mikael Aulanko, M.Sc. (Tech.)			
<p>Wind turbines are expected to be reliable and offer great availability. This is why all the components of a turbine should be reliable. The aim of this thesis was to examine reliability and to investigate possible reliability tools for the mechanical designing of a frequency converter for wind turbines. One aim was to decide when to use these tools in the product development process.</p> <p>The beginning of this thesis examines the fundamentals of reliability. The next section presents the qualitative and semi-quantitative reliability tools chosen: the Ishikawa diagram, failure mode and effects analysis, and fault tree analysis. The chosen analyses were accomplished for two different projects which had reached different stages of the product development process.</p> <p>According to the results, the Ishikawa diagram should be used to start the reliability analysis. It is a good tool for clearing the researchers' minds. The actual and more thorough reliability analysis should be conducted with failure mode and effects analysis. Fault tree analysis works better for more complicated faults than what was found in these analyses. These tools can be used to compare concepts. Before designing the first prototype, these tools can be used to analyze the reliability of the product. These analyses should be updated during the product development process. A check-list of previous faults should be available during design in order to make a more reliable product.</p>			
Date: 8.10.2010		Language: Finnish	
		Number of pages: 96	
Keywords: reliability, Ishikawa diagram, FMEA, FTA, frequency converter, mechanical designing, product development			

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Drivesin Wind AC osastolle. Työn ohjasi ABB:ltä Mikael Aulanko, jota haluan kiittää uhratusta ajasta, ohjauksesta ja hyvistä neuvoista. ABB:ltä haluan myös kiittää Teemu Oksasta, sekä kaikkia niitä henkilöitä, joilta olen saanut neuvoja työhöni. Kiitokset kuuluvat myös kaikille niille, jotka osallistuivat luotettavuusanalyysiin.

Työn valvojana toiminutta professori Petri Kuosmasta haluan kiittää avusta ja neuvoista.

Kiitokset kuuluvat myös veljelleni työni oikolukemisesta.

Kiitokset tyttöystävälleni Pydelle kannustuksesta ja oikolukemisesta.

Espoossa, 8.10.2010



---

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
1.1	TAUSTA .....	1
1.2	TUTKIMUSONGELMA.....	1
1.3	TAVOITTEET .....	1
1.4	RAJAUKSET.....	2
1.5	MENETELMÄT .....	2
1.6	TOIMEKSIANTAJA .....	2
<b>2</b>	<b>LUOTETTAVUUS JA SEN ARVIOIMINEN .....</b>	<b>3</b>
2.1	LUOTETTAVUUS.....	3
2.1.1	<i>Korjattavat ja korjauskelvottomat systeemit .....</i>	<i>4</i>
2.1.2	<i>Termejä ja käsitteitä.....</i>	<i>6</i>
2.1.3	<i>Luotettavuusjohtaminen .....</i>	<i>7</i>
2.1.4	<i>Luotettavuuskustannukset .....</i>	<i>9</i>
2.1.5	<i>Ympäristön ja ihmisen vaikutus luotettavuuteen .....</i>	<i>11</i>
2.2	RISKI- JA LUOTETTAVUUSARVIOINTI.....	13
2.2.1	<i>Riskien tunnistaminen .....</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Riskien analysointi .....</i>	<i>14</i>
2.2.3	<i>Riskien arviointi .....</i>	<i>15</i>
2.2.4	<i>Luotettavuustyökalun valinta .....</i>	<i>15</i>
<b>3</b>	<b>LUOTETTAVUUSTYÖKALUJA .....</b>	<b>18</b>
3.1	AIVORIIHI .....	18
3.1.1	<i>Tausta.....</i>	<i>18</i>
3.1.2	<i>Prosessi.....</i>	<i>19</i>
3.1.3	<i>Edut ja haitat.....</i>	<i>19</i>
3.2	LOHKOKAAVIO .....	19
3.2.1	<i>Tausta.....</i>	<i>20</i>
3.2.2	<i>Edut ja haitat.....</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Lohkot sarjassa ja rinnan.....</i>	<i>21</i>
3.2.4	<i>Esimerkki – Auto .....</i>	<i>22</i>
3.3	SYY-SEURAUUS-ANALYYSI (ISHIKAWA DIAGRAM).....	23
3.3.1	<i>Tausta.....</i>	<i>23</i>
3.3.2	<i>Prosessi.....</i>	<i>24</i>
3.3.3	<i>Edut ja haitat.....</i>	<i>26</i>
3.3.4	<i>Esimerkki – Likaa maalipinnassa .....</i>	<i>27</i>
3.4	VIKA- JA VAIKUTUSANALYYSI (FMEA).....	28
3.4.1	<i>Tausta.....</i>	<i>28</i>
3.4.2	<i>Analyysityypit.....</i>	<i>29</i>
3.4.3	<i>Prosessi.....</i>	<i>31</i>
3.4.4	<i>Edut ja haitat.....</i>	<i>34</i>
3.4.5	<i>Riskiluku (RPN).....</i>	<i>36</i>
3.4.6	<i>FMECA .....</i>	<i>38</i>
3.4.7	<i>Esimerkki – Auton sähköikkunat .....</i>	<i>39</i>
3.5	VIKAPUUANALYYSI (FTA) .....	40
3.5.1	<i>Tausta.....</i>	<i>40</i>
3.5.2	<i>Prosessi.....</i>	<i>43</i>
3.5.3	<i>Edut ja haitat.....</i>	<i>45</i>
3.5.4	<i>Symbolit.....</i>	<i>46</i>
3.5.5	<i>Esimerkki – Talon valot eivät toimi.....</i>	<i>47</i>
3.6	DELFOI-METODI.....	48
3.6.1	<i>Tausta.....</i>	<i>48</i>
3.6.2	<i>Prosessi.....</i>	<i>49</i>
3.6.3	<i>Edut ja haitat.....</i>	<i>50</i>



3.7	TARKISTUSLISTA (CHECK-LISTS).....	51
3.7.1	<i>Prosessi</i> .....	51
3.7.2	<i>Edut ja haitat</i> .....	51
3.8	TIETOKONEAVUSTEISET LUOTETTAVUUSTYÖKALUT .....	52
4	<b>TUTKIMUSMENETELMÄT</b> .....	53
4.1	TUOTEKEHITYSMALLI.....	53
4.2	TAAJUUSMUUTTAJA.....	54
4.2.1	<i>Taajuusmuuttaja tuulivoimassa</i> .....	55
4.2.2	<i>Kaapitetun taajuusmuuttajan rakenne</i> .....	56
4.3	TUTKIMUSKOhteET.....	56
4.3.1	<i>Tornado</i> .....	57
4.3.2	<i>Wild Cowberry</i> .....	57
4.4	TIEDONKERUUTAVAT .....	57
4.4.1	<i>Syy-seuraus-kaavion tekeminen</i> .....	58
4.4.2	<i>Vika- ja vaikutusanalyysin tekeminen</i> .....	58
4.4.3	<i>Vikapuuanalyysin tekeminen</i> .....	58
5	<b>TUTKIMUSTULOKSET</b> .....	59
5.1	SY-Y-SEURAU-ANALYYSI .....	59
5.1.1	<i>Syy-seuraus-analyysi – Tornado</i> .....	59
5.1.2	<i>Syy-seuraus-analyysi – Wild Cowberry</i> .....	60
5.2	VIKA- JA VAIKUTUSANALYYSI.....	62
5.2.1	<i>Vika- ja vaikutusanalyysi – Tornado</i> .....	62
5.2.2	<i>Vika- ja vaikutusanalyysi – Wild Cowberry</i> .....	64
5.3	VIKAPUUANALYYSI .....	66
5.3.1	<i>Vikapuuanalyysi – Tornado</i> .....	67
5.3.2	<i>Vikapuuanalyysi – Wild Cowberry</i> .....	68
6	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET</b> .....	70
6.1	SY-Y-SEURAU-ANALYYSI .....	70
6.2	VIKA- JA VAIKUTUSANALYYSI.....	72
6.2.1	<i>Vika- ja vaikutusanalyysin pohja</i> .....	74
6.3	VIKAPUUANALYYSI .....	77
6.4	MUITA SUOSITUKSIA LUOTETTAVUUDEN PARANTAMISEKSI .....	78
6.5	LUOTETTAVUUSTYÖKALUJEN KÄYTTÖ TUOTEKEHITYKSEN ERI VAIHEISSA .....	79
6.6	TUTKIMUKSEN ARVIOIMINEN.....	81
7	<b>YHTEENVETO</b> .....	83
	<b>LÄHDELUETTELO</b> .....	87
	<b>LIITTEET</b> .....	90
	LIITE 1 LUOTETTAVUUSTYÖKALUN VALINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	90
	LIITE 2 TAULUKOT RPN:N KERTOIMISTA.....	91
	LIITE 3 VIKA- JA VAIKUTUSANALYYSIN POHJA .....	94
	LIITE 4 VIKA- JA VAIKUTUSANALYYSIN UUSI POHJA .....	95
	LIITE 5 TARKISTUSLISTAN POHJA.....	96



**LYHENTEET**

A	Käytettävyys (Availability)
ABB	Asea Brown Boveri
ACU	Taajuusmuuttajan ohjausyksikkö (Auxiliary Control Unit)
BIT	Sisäänrakennettu testi (Built-in-Test)
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer Aided Design)
CCF	Yhteisvika (Common Cause Failure)
CMF	Yhteisvioittumistapa (Common Mode Failure)
D	Ilmeneminen (Detection)
EN	Eurooppalainen standardi
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
FMEA	Vika- ja vaikutusanalyysi (Failure Mode and Effects Analysis)
FMECA	Vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysi (Failure, Mode, Effects and Criticality Analysis)
FTA	Vikapuuanalyysi (Fault Tree Analysis)
ICU	Taajuusmuuttajan liityntäkaappi (Incoming Unit)
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (International Electrotechnical Commission)
IGBT	Tehopuolijohdetransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor)
INU	Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaaja (Inverter Unit)
ISO	Kansainvälinen standardoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
ISU	Taajuusmuuttajan tasasuuntaaja (IGBT Supply Unit)

LCL	Taajuusmuuttajan verkkosuodatin
MIL-STD	Yhdysvaltojen sotilasstandardi (United States Military Standard)
MTBF	Keskimääräinen vikaväli (Mean Time between Failures)
MTTF	Keskimääräinen vikaantumisaika (Mean Time to Failure)
MTTR	Keskimääräinen korjausaika (Mean Time to Repair)
O	Toteutuminen (Occurrence)
RPN	Riskiluku (Risk Priority Number)
S	Vakavuus (Severity)
SAE	Autoalan standardointijärjestö (Society of Automotive Engineers)
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS
U	Epäkäytettävyys (Unavailability)
VVA	Vika- ja vaikutusanalyysi (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)
VVKA	Vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysi (Failure, Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA)

# 1 JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty ABB (Asea Brown Boveri) Oy Drives:in Wind AC:n pyynnöstä. Työssä tutustutaan luotettavuuteen ja tutkitaan luotettavuustyökaluja, joita voidaan hyödyntää taajuusmuuttajien tuotekehityksessä.

## 1.1 Tausta

Taajuusmuuttajia on totuttu käyttämään teollisuudessa säätämässä moottorien vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta portaattomasti. Tämän lisäksi niitä käytetään myös tuuliturbiineissa tasaamaan sähköntuotannossa syntyvään vaihtelua, jotta sähkö olisi sopivaa sähköverkkoon syötettäväksi. Koska tuuliturbiinivalmistajat antavat asiakkailleen takuun siitä, että laitteistolla on suuri toimintavarmuus, täytyy sen kaikkien osien ja komponenttien täyttää nämä vaatimukset. Tästä syystä osien täytyy olla laadukkaita ja luotettavia.

Tuuliturbiinit asennetaan yleensä erilleen asutuksesta vaikeakulkuiseen maastoon tai haastavimmassa tapauksessa merelle, minkä takia sen täytyy tarvita mahdollisimman vähän huoltotoimenpiteitä. Huollosta tekee vaikeaa myös se, että taajuusmuuttaja saattaa sijaita tuuliturbiinin huipussa naselissa (nacelle) tai sen juuressa. Näistä syistä osien tulisi olla mahdollisimman luotettavia, jotta ylimääräisiltä kustannuksilta vältytään.

## 1.2 Tutkimusongelma

Tutkimusongelmana on selvittää, mitä luotettavuustyökaluja voidaan hyödyntää tuuliturbiineihin tarkoitettujen taajuusmuuttajien tuotekehityksessä. Lisäksi tutkimusongelmana on löytää paras ajankohta sille, milloin olisi optimaalisinta käyttää näitä sopivia luotettavuustyökaluja.

## 1.3 Tavoitteet

Tutkimuksen tarkoituksena on tutustua luotettavuuteen ja mekaniikkasuunnittelun luotettavuustyökaluihin tuotekehityksen näkökulmasta. Tavoitteena on tutkia laadullisia ja puoli-määrällisiä luotettavuustyökaluja, jotka sopivat kaapitettujen taajuusmuuttajien mekaniikkasuunnitteluun. Sopiville luotettavuustyökaluille on tavoitteena myös löytää optimaalinen käyttöhetki tuotekehitysprosessissa.

## 1.4 Rajaukset

Taajuusmuuttajien osalta tämä työ rajoittuu niihin kaapitettuihin ABB Drives Wind AC:n tuotteisiin, joita on tarkoitus käyttää tuulivoimaloiden yhteydessä sähköntuotannossa. Työssä käsitellään ainoastaan laadullisia tai puoli-määrällisiä luotettavuustyökaluja. Tutkimuksen työkalut valittiin perustuen kirjallisuuteen, luotettavuustyökalujen ominaisuuksiin ja ABB:n aikaisempiin kokemuksiin. Näiden rajausten lisäksi koko diplomityö tehdään mekaniikkasuunnittelun tarpeiden mukaisesti, esimerkiksi sähkökomponenttien luotettavuuteen, joihin mekaniikkasuunnittelija ei voi vaikuttaa ei keskitytä.

## 1.5 Menetelmät

Luotettavuusanalyysit tehdään kahdelle eri projektille, jotka ovat eri vaiheissa tuotekehitysprosessia. Toinen projekteista on konseptisuunnitteluvaiheessa ja toinen on lähes valmis ylläpitoa varten. Analyysit tehdään projekteihin liittyvissä kahdessa valikoidussa pienemmässä tuotekehityksryhmässä.

## 1.6 Toimeksiantaja

Wind AC suunnittelee ja valmistaa tuulivoimaan tarkoitettua taajuusmuuttajia aina 6 MW:in asti. Tuotteet jakautuvat pääasiassa kahteen erityyppiseen ratkaisuun: kaksoissyötettyyn ja täystehotaajuusmuuttajaan. Kaksoissyötetyssä taajuusmuuttajassa vain osa tuotetusta sähköstä kulkee taajuusmuuttajan kautta, kun taas täystehotaajuusmuuttajassa kaikki sähkö kulkee käytön läpi. Taajuusmuuttajien tarkoitus tuulivoimassa on muuttaa tuulesta saatava sähkö sopivaksi paikallisiin sähköjakeluverkkoihin ja tasata tuulesta johtuvia vaihteluja.



## 2 LUOTETTAVUUS JA SEN ARVIOIMINEN

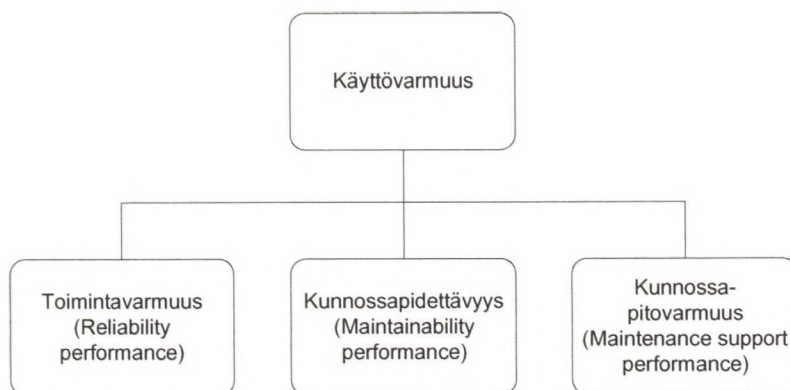
Tässä luvussa kerrotaan luotettavuudesta ja siihen liittyvistä yleisistä termeistä ja käsitteistä, jotka auttavat ymmärtämään luotettavuutta paremmin. Tämän lisäksi käsitellään luotettavuusjohtamista ja henkilöstöä sen näkökulmasta sekä luotettavuudesta johtuvia kustannuksia. Luvun lopussa on teoriaa riskien ja luotettavuuksien arvioinnista.

### 2.1 Luotettavuus

Takuu tulee nykyään melkein jokaisen tuotteen mukana. Takuulla tarkoitetaan sitä, että valmistaja lupautuu korjaamaan rikkoutuneen tuotteen sen takuuaikana. Asiakkaalle ei siis tule mitään korjauskustannuksia, vaan nämä kustannukset tulevat valmistajalle. Mitä suurempi vika tai mitä useammin tuote vikaantuu, sitä enemmän valmistajalle tulee ylimääräisiä kustannuksia. Kun takuuaika umpeutuu ja tuote vaatii korjaamista, tulevat kaikki kustannukset asiakkaalle ja valmistaja saa tuloja korjaamisesta. (O'Connor 1995, s. 3 ja Yang 2007, s. 10–11)

Takuukustannukset ovat vain yksi syy sille, miksi tarvitaan aikariippuvainen laatukäsite luotettavuus. Laatua tarkastellaan vain hetkellisesti ja silloin se joko hyväksytään tai ei. Tästä syystä on kehitettävä tapa tutkia laatua myös ajallisesti. Luotettavuutta voidaan siis ajatella tuotteen laatuna tai vikaantumisina sen elinkaaren aikana. Jotta tuotteen luotettavuutta pystytään arvioimaan, on tärkeää ymmärtää, miten se vikaantuu. (O'Connor 1995, s. 3 ja Yang 2007, s. 10–11)

Erään määritelmän mukaan luotettavuus on: *Todennäköisyys sille, että asia suoriutuu vaadituista tehtävistä määritellyissä olosuhteissa määritellyn ajanjakson ajan.* SFS-standardin mukaan luotettavuus on: *”Yleistermi, jota käytetään kuvaamaan käyttövarmuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä: toimintavarmuus, kunnossapidettävyyys ja kunnossapitovarmuus.”* Vikaantumistodennäköisyys on yleisesti se asia, mitä luotettavuusanalyseissä arvioidaan. Tämä arvio perustuu usein asiantuntijoiden mielipiteisiin ja kokemuksiin tai kerättyihin tilastoihin. Kuvassa 2.1 esitetään SFS-standardin mukainen käyttövarmuus. (O'Connor 1995, s. 3 ja SFS-EN ISO 9000 2005, s. 34)



**Kuva 2.1** Käyttövarmuuden osatekijät (muokattu) (SFS-IEC 50(191), s. 114–115)

### 2.1.1 Korjattavat ja korjauskelvottomat systeemit

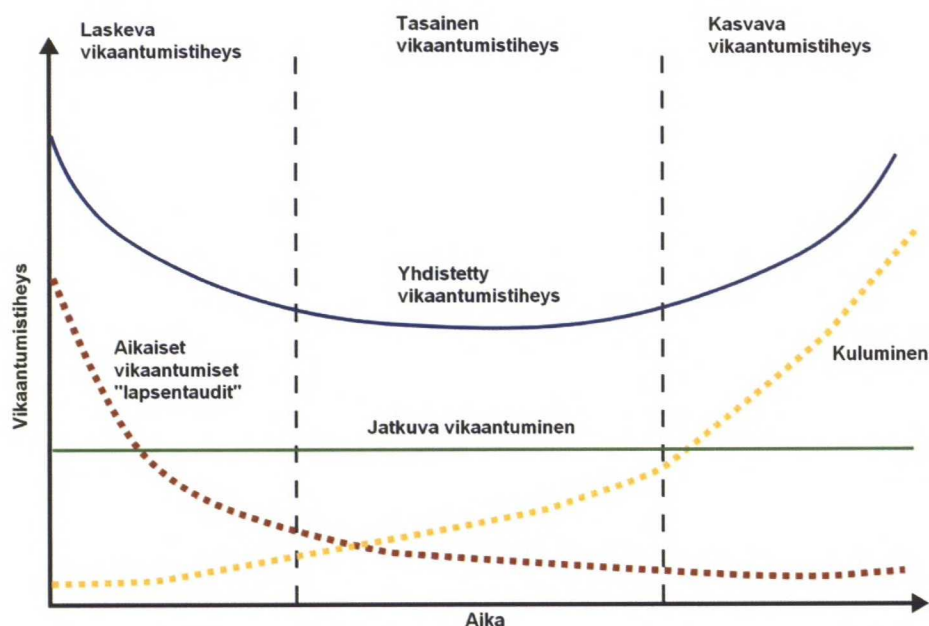
Korjattavien ja korjauskelvottomien systeemien ero on tärkeä ymmärtää. Korjauskelvottomia asioita ovat esimerkiksi lamppu tai rakettimoottori. Tällaisille korjauskelvottomille systeemeille ilmoitettava vikaantumistodennäköisyys tarkoittaa usein sen odotettua elinikää. Tämä siksi, että nimensä mukaisesti niitä ei voi korjata, vaan ne on aina vaihdettava uusiin. Jos osa vikaantuu korjauskelvottomassa systeemissä, koko systeemi vikaantuu. Tällaisen systeemin luotettavuus tulee sen heikoimman komponentin luotettavuudesta. Todennäköisyyttä, jolla ensimmäinen (ja ainoa) vika tapahtuu, kutsutaan vikaantumistiheydeksi (Hazard rate). (O'Connor 1995, s. 6 ja Yang 2007, s. 13)

Korjattaville systeemeille luotettavuus tulee siitä, kuinka usein se vikaantuu tiettyä ajanjaksoa kohden. Nämä systeemit voivat siis vikaantua useammin kuin vain kerran. Korjattaville asioille on myös luotu vikaantumistiheys (Failure rate) käsite, joka on vikaantumisten lukumäärä suhteessa ajanjaksoon. Käytettävyyys on myös tärkeä asia korjattavissa systeemeissä siksi, että kunnossapitotoimet lyhentävät yhdessä vikatiheyden kanssa systeemin käytettävyyttä. Kunnossapidon tyypillä voidaan vaikuttaa sen keston, esimerkiksi ennakoivat huollot voivat olla korjaavia lyhyempiä. Jotta saadaan käsitys systeemin käytettävyydestä, pitää ymmärtää sen luotettavuuden ja kunnossapidon väliset yhteydet. (O'Connor 1995, s. 6–7)

Joitakin systeemeitä voidaan pitää sekä korjattavina että korjauskelvottomina. Tällaisia ovat esimerkiksi ohjukset. Ennen laukaisua se on korjattava, eli sitä voidaan huoltaa ja testata, mutta laukaisun jälkeen se muuttuu korjauskelvottomaksi.

Korjattavan systeemin muuttumiseen korjauskelvottomaksi vaikuttavat monet erilaiset tekijät, kuten aika. Esimerkiksi auton moottori muuttuu korjauskelvottomaksi sen vanhentuessa. Usein tällaisissa tapauksissa ratkaisevana tekijänä ovat huoltokustannukset. Näille muuttuville olotiloille pitäisi kaikille tehdä omat luotettavuusanalyysit, jotta tunnettaisiin koko systeemin todellinen luotettavuus. (O'Connor 1995, s. 7)

Yleensä komponenteille ilmoitetaan keskimääräinen vikaantumistiheys, mutta todellisuudessa se saattaa vaihdella. Käyttöönoton alkuvaiheessa voi ilmentyä laskevaa vikaantumistiheyttä. Tällöin hajoavat usein sellaiset elektroniset komponentit, joita on vaikea testata ilman käyttöä. Tämän vaiheen vioista puhutaan usein lapsentauteina. Alun jälkeen koittaa tasainen vikaantumistiheysjakso, jolloin asiat yleensä hajoavat johtuen ylitetyistä turvarajoista, kuten liian suurista virroista tai voimista. Kasvava vikaantumistiheys ilmenee usein, kun systeemi on ollut käytössä jo pitkään ja esimerkiksi sykliset voimat ovat heikentäneet sen ominaisuuksia. Yhdistettynä nämä kolme erityyppistä vikaantumistiheyttä muodostavat niin sanotun kylpyammekäyrän (Bathtub curve), kuten kuvassa 2.2 esitetään. (NASA.gov, O'Connor 1995, s. 7–8, Stamatis 1995, s. 113 ja Yang 2007, s. 13–14)



**Kuva 2.2** Kylpyammekäyrä, jossa on esitetty eri vikaantumistiheysvaiheet (muokattu) (NASA.gov)



Yleensä luotettavuudella tarkoitetaan lähinnä sellaisia tapauksia, joissa osat hajoavat esimerkiksi liiallisen kuormituksen johdosta. On kuitenkin olemassa monia muitakin tapoja, joilla osat saattavat hajota. Esimerkiksi:

- Ruuvit ovat löysällä johtuen liian löysästä kiristämisestä, tai siitä että ne eivät kulumisen vuoksi kiristy tarpeeksi.
- Tiivisteet ovat kuluneet ja näin ollen paine katoaa putkistossa.
- Vastus kasvaa sähköliitoksissa, mikä johtuu hapettumisesta tai valokaarista.
- Suojapinnat pettävät, kun esimerkiksi maali lohkeilee tai metallin pinnoitus kuluu.
- Pinnit taipuvat elektronisessa liitoksessa.
- Osia käsitellään, asennetaan, kunnossapidetään tai säilytetään väärin.
- Alisysteemit eivät toimi, koska niissä on suuret toleranssit. (O'Connor 1995, s. 168 ja Stamatis 1995, s. 113)

Edellä olevia vikaantumistapoja voi olla vaikea löytää, kun tehdään suunnittelulle luotettavuusanalyysiä. Nämä asiat tulisi siis koettaa huomioida analyyseissä, vaikka ne ovatkin vain hyviä arvauksia tulevasta. (O'Connor 1995, s. 168)

### 2.1.2 Termejä ja käsitteitä

Luotettavuuteen liittyy monia eri termejä. Koska luotettavuus voidaan ajatella eräänlaisena ajasta riippuvana laatuna, niin myös siihen liittyvät käsitteet liittyvät aikaan. Monet käsitteet ovat riippuvaisia tuotteen vikaantumistiheyksistä, joita käsitellään luvussa 2.1.1.

Vikaantumistiheydelle käytetään symbolia  $\lambda$ . Tämä ilmaisee vikaantumisten määrän tiettyä ajanjaksoa kohden. Vikaantumistiheydestä on johdettu keskimääräinen vikaantumisväli (Mean Time between Failures, MTBF). Keskimääräinen vikaantumisväli on riippuvainen keskimääräisestä vikaantumisajasta (Mean Time to Failure, MTTF) ja keskimääräisestä korjausajasta (Mean Time to Repair, MTTR). Nämä kaikki termit ilmoittavat siihen liittyvän ajanjakson. Keskimääräisen vikaantumisvälin ja keskimääräisten vikaantumisajan ja korjausajan välinen



riippuvuus on:

$$MTBF = MTTF + MTTR. \quad (1)$$

(Kirmann 2005, s. 9–11, IEC 61703 2001, s.47–49 ja SFS-IEC 50(191) 1996, s. 75–78)

Koska luotettavuudella pyritään usein tuotteen suureen käytettävyyteen (Availability, A), niin myös tälle on luotu oma laskukaavansa:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}, \quad (2)$$

jossa *MTTF* on keskimääräinen vikaantumisaika ja

*MTTR* on keskimääräinen korjausaika.

Käytettävyys ilmoitetaan yleensä prosentteina. Tuotteeseen liittyvä epäkäytettävyys (Unavailability, U) saadaan vähentämällä täydestä käytettävyydestä todellinen käytettävyys A:

$$U = 1 - A. \quad (3)$$

(Kirmann 2005, s. 9–11 ja SFS-IEC 50(191) 1996, s. 67–68)

### 2.1.3 Luotettavuusjohtaminen

Luotettavuuden täytyy olla osa yrityksen strategiaa, jotta luotettavuus olisi yksi sen valttikorteista. Se täytyy siis huomioida jo ylimmän johdon tasolla. Jos näin ei ole, on todennäköistä, etteivät luotettavuusvastaavat ja suunnittelijatkaan toimi parhaalla mahdollisella tavalla. Selkeitä rahallisia syitä luotettavuudelle ovat kalliit takuuhuollot ja vaikeasti saatavat komponentit. Vaikeammin mitattavissa olevia perusteluja ovat yrityksen ja tuotteen maine, asiakassuhteet ja kilpailukyky. (O'Connor 1995, s. 351, Salomäki 2003, s.75, 88–89 ja Yang 2007, s. 41)

Viimeisin selkeä mahdollisuus vaikuttaa tuotteen luotettavuuteen on sen valmistus ja testaus. Tästä syystä tuotteen laatua täytyy tarkkailla. Jotta laaduntarkkailusta olisi myös hyötyä luotettavuuden kannalta, täytyy laaduntarkkailu suunnitella niin, että se

huomioi myös luotettavuuden. Tarkkailusta saatu tieto tulisi kerätä sekä laadun että luotettavuuden käyttöön. (O'Connor 1995, s. 351)

Luotettavuuden tulisi olla integroituna tuotekehitykseen eikä kulkea sen rinnalla, jotta päästäisiin parhaaseen tulokseen. Matriisiorganisaatioissa projekteille voidaan nimetä luotettavuudessa vastuussa oleva henkilö. Näitä luotettavuushenkilön vastuita tulisi kierrättää eri henkilöillä. Kierrättämällä luotettavuusvastuuta saadaan jaettua tärkeitä tietoja luotettavuudesta. (O'Connor 1995, s. 351, 369 ja SFS-EN 60300-1 2004, s. 16)

Vaikka projektille onkin nimetty oma luotettavuusinsinööri, ei projektipäällikön vastuuta ja valtaa saisi viedä pois. Usein projektipäällikkö on niitä ainoita henkilöitä, jotka tietävät miten paljon resursseja, kuten aikaa, voidaan käyttää mihinkin. Tämän takia luotettavuusinsinöörin täytyy olla usein vuorovaikutuksissa projektipäällikön kanssa, jotta luotettavuusinsinööri tietää, mitä hän voi tehdä resurssien puitteissa. (O'Connor 1995, s. 351, 369)

Luotettavuusinsinöörien ei tarvitse olla tuotteiden asiantuntijoita, eikä heidän tarvitse tietää kaikkea sähkö- ja konetekniikasta. Riittävä kokemus ja tieto ymmärtää suunnittelijoiden mahdolliset ongelmat riittää. Luotettavuusinsinöörien tehtävä ei ole ratkaista suunnittelijoiden ongelmia, vaan auttaa heitä estämään ja löytämään niitä. Parhaat ehdokkaat luotettavuusinsinööreiksi ovat henkilöt, jotka ovat työskennelleet testauksessa, tuotetuessa, huollossa tai kunnossapidossa. (O'Connor 1995, s. 369, SFS-EN 60300-1 2004, s. 16 ja Yang 2007, s. 60–61)

Suunnittelijoiden on tunnettava suunnittelu, valmistus ja testaus eli koko tuotekehitysprosessi, jotta he toimivat luotettavasti. Näiden lisäksi heidän tulee ymmärtää tilastollisia insinööritekniikoita. Luotettavuuskoulutuksia tulisi olla kahdenlaisia, osalle tuotekehitysosastosta tulisi antaa yleinen luotettavuuskoulutus. Osalle osastosta koulutuksen tulisi olla kattavampi, jolloin heistä tulisi jonkinasteisia luotettavuuden asiantuntijoita. Suunnitteluosasto toimii hyvin ja tehokkaasti, kun sillä on tasapainoinen ryhmä suunnittelijoita luotettavuuden näkökulmasta. (O'Connor 1995, s. 369, SFS-EN 60300-1 2004, s. 16 ja Yang 2007, s. 60–61)

Sopivan luotettavuusryhmän valinnan ja koulutuksen lisäksi, on myös tärkeää kouluttaa, tiedottaa ja motivoida myös muita työntekijöitä kuten asentajia. Useimmat luotettavuusongelmat johtuvat inhimillisestä tekijästä, kuten tietämättömyys, taidon puute tai yrittäminen. Jotta näiltä ongelmilta välttyttäisiin, tulisi kaikkien saada jonkinlainen koulutus tai tiedotus. (O'Connor 1995, s. 369 ja IEC 62508 2010, s. 13–16)

## 2.1.4 Luotettavuuskustannukset

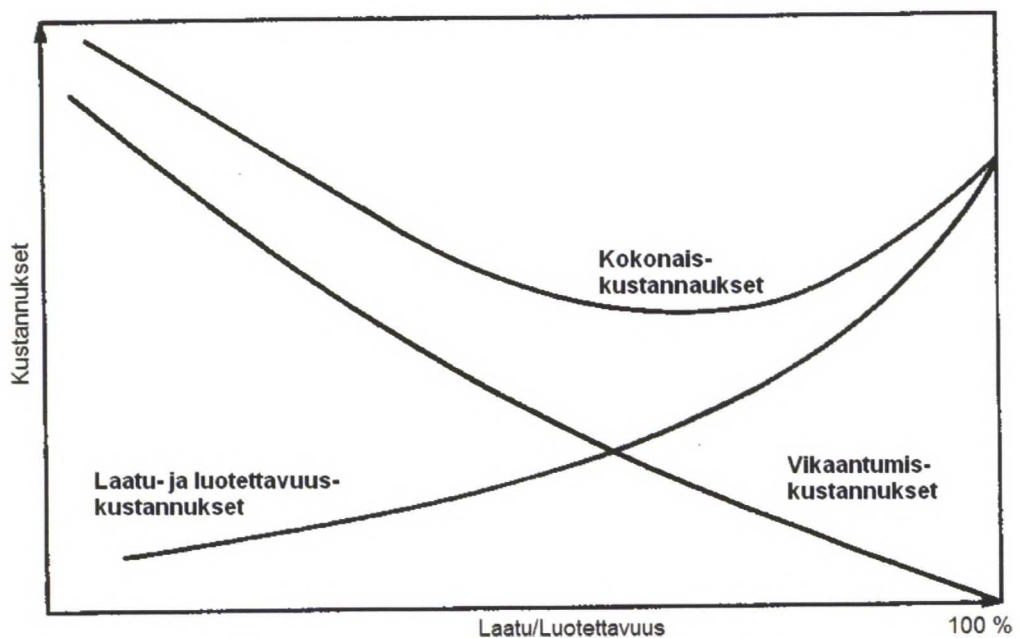
Mitä aikaisemmin vika tai epäluotettava suunnittelu havaitaan suunnittelussa, sitä halvemmaksi sen korjaaminen tulee. Lähes aina on halvempaa korjata virhe, joka johtuu tuotannosta tai virheellisestä suunnittelusta, kuin elää niiden seurausten kanssa. (O'Connor 1995, s. 353 ja Salomäki 2003, s.72)

Luotettavuuteen liittyvät kustannukset voidaan lajitella kolmeen eri ryhmään:

- Ennaltaehkäisevät kustannukset ovat niitä, jotka muodostuvat nimensä mukaisesti ennaltaehkäisevistä toimenpiteistä. Nämä ovat laadunvalvonta, luotettavuutta lisäävä toiminta, koulutus, harjoittelu ja johtaminen.
- Arviointikustannukset tulevat testauksesta ja mittauksista sekä prosessin valvonnasta ja laadun auditoinnista.
- Vikaantumiskustannukset tulevat vikaantumisista, jotka johtuvat luotettavuuden puutteesta. Sisäiset vikaantumiskustannukset muodostuvat valmistuksessa syntyvistä virheistä. Ulkoiset vikaantumiskustannukset muodostuvat takuuajalla syntyvistä toimintahäiriöistä, jotka johtuvat epäluotettavasta tuotteesta. (O'Connor 1995, s. 353)

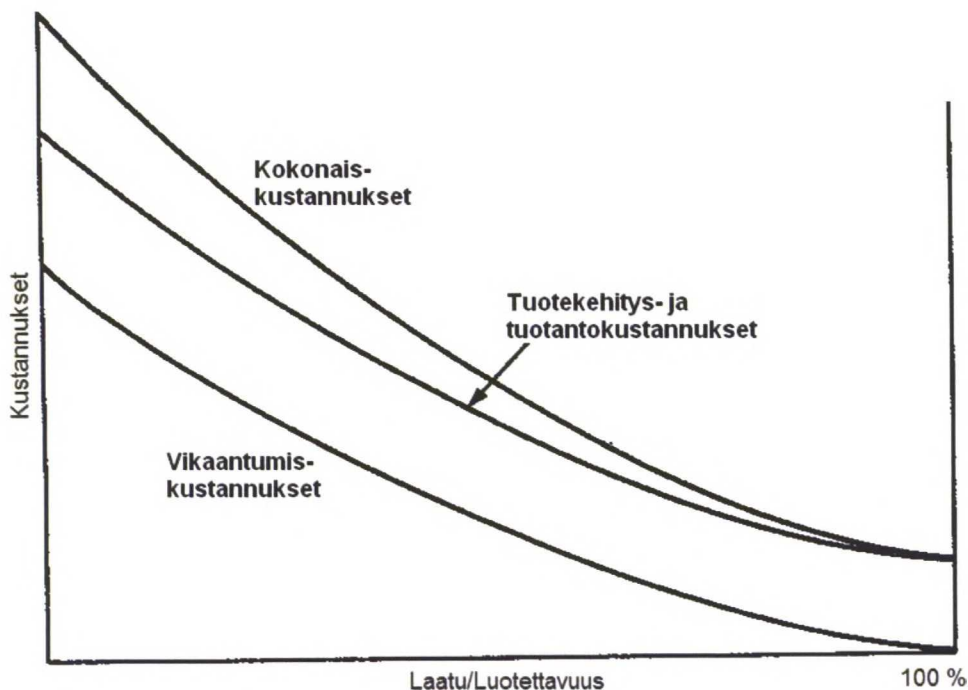
Koska kustannuksia pyritään minimoimaan, on hyvä tunnistaa edellä mainittujen kustannusten riippuvuudet keskenään. Vikaantumiskustannukset riippuvat ennaltaehkäisevistä ja arviointikustannuksista. Näin ollen panostamalla näihin kahteen kustannuserään, saadaan vikaantumiskustannuksia pienennettyä. Ennaltaehkäiseviä ja arviointikustannuksia voidaan myös ajatella laatu- ja luotettavuuskustannuksina. (O'Connor 1995, s. 13, 15, 353)

Yleensä ajatellaan, että luotettavuus ja erilaiset luotettavuusohjelmat ovat kalliita. Väittämää tukee myös usein esitetty kuvaaja (kuva 2.3) luotettavuus- ja vikaantumiskustannusten välisestä yhteydestä. Kuva 2.3 voi kuitenkin olla harhaanjohtava. Asiaa tulisi lähestyä siten, että vikaantuminen voi tapahtua, jos tuote ei ole täysin luotettava. Tästä syystä tulee tutkia vikaantumisien vaikutuksia ja erityisesti niitä kustannuksia, jotka aiheutuvat vaikutuksen estämisestä tai korjaamisesta verrattuna niihin menoihin, jotka syntyvät, jos ei tehdä mitään. Näiden kustannusten analysoinnin jälkeen tullaan lähes aina siihen tulokseen, että kokonaiskustannukset laskevat, kun luotettavuutta on parannettu. Tämä uudentyypinen ajattelu esitetään kuvassa 2.4. Voidaan siis todeta, että useat luotettavuusohjelmat maksavat itsensä helposti takaisin. (O'Connor 1995, s. 13, 15 ja Yang 2007, s. 47–48)



**Kuva 2.3** Perinteinen kustannusjakauma (muokattu) (O'Connor 1995, s. 15)





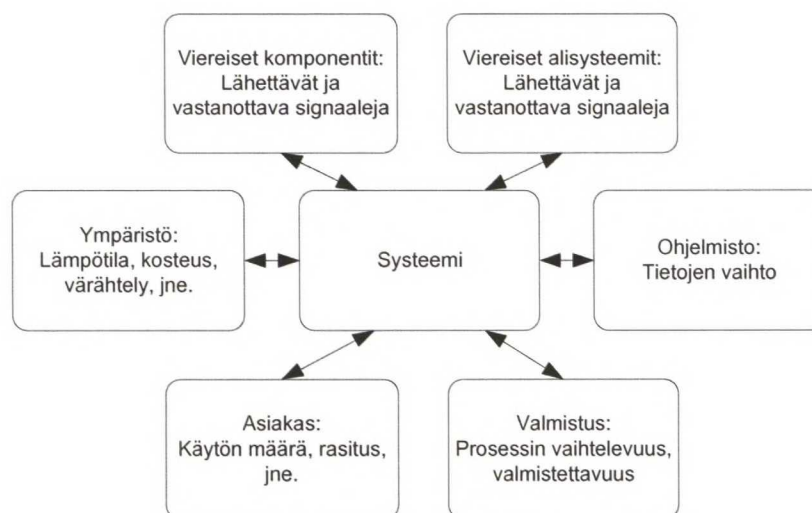
**Kuva 2.4** Uusi kustannusjakauma (muokattu) (O'Connor 1995, s. 15)

Ongelmana tässä uudessa kustannusajattelussa on se, ettei tiedetä, kuinka paljon luotettavuuteen tulee panostaa. Lisäksi on vaikea sanoa, mitkä kustannukset tulevat luotettavuudesta ja sen kehityksestä ja mitkä tulevat normaalista tuotekehityksestä, sillä integroituun luotettavuustuotekehitykseen kuuluu monia eri osa-alueita. Voidaan ajatella, että luotettavuusohjelman alussa kustannukset ovat selkeitä, kun opetellaan toimimaan luotettavasti. Näitä selkeitä kustannuksia ovat esimerkiksi koulutukset. Myöhemmässä vaiheessa toimitaan vain normaalisti mutta luotettavammin, jolloin luotettavuudesta johtuvat kustannukset häviävät. (O'Connor 1995, s. 15–16 ja Salomäki 2003, s.72)

### 2.1.5 Ympäristön ja ihmisen vaikutus luotettavuuteen

Ympäristöt, missä tuote tulee olemaan, täytyy huomioida hyvin tarkasti. Tuote tulee olemaan todennäköisesti elinkaarensa aikana useassa eri paikassa ja siihen kohdistuu monia eri tapahtumia. Esimerkiksi tuote säilötään, kuljetetaan, käytetään, huolletaan ja poistetaan käytöstä. Näiden kaikkien vaiheiden aikana tuotteen tulisi toimia suunnitellulla tavalla ja olla samalla turvallinen ja luotettava. Elinkaaren aikana tuotteeseen vaikuttaa monia eri asioita kuten värinöitä, kosteutta ja epäpuhtauksia. Näistä huolimatta tuotteen on toimittava suunnitellusti. Ympäristöön vaikuttavat osittain henkilöt, jotka toimivat valmistuksessa, logistiikassa, käytössä ja

kunnossapidossa. Tästä syystä myös heidät tulisi kouluttaa ja motivoida, jotta tuote on yhtä luotettava läpi sen elinkaaren. Tuotteeseen vaikuttavia asioita esitetään kuvassa 2.5. (O'Connor 1995, s. 153, SFS-EN ISO 9004 2009, s. 20–22 ja Yang 2007, s. 42, 132)



**Kuva 2.5** Systeemin ympäristö (muokattu) (Yang 2007, s. 132)

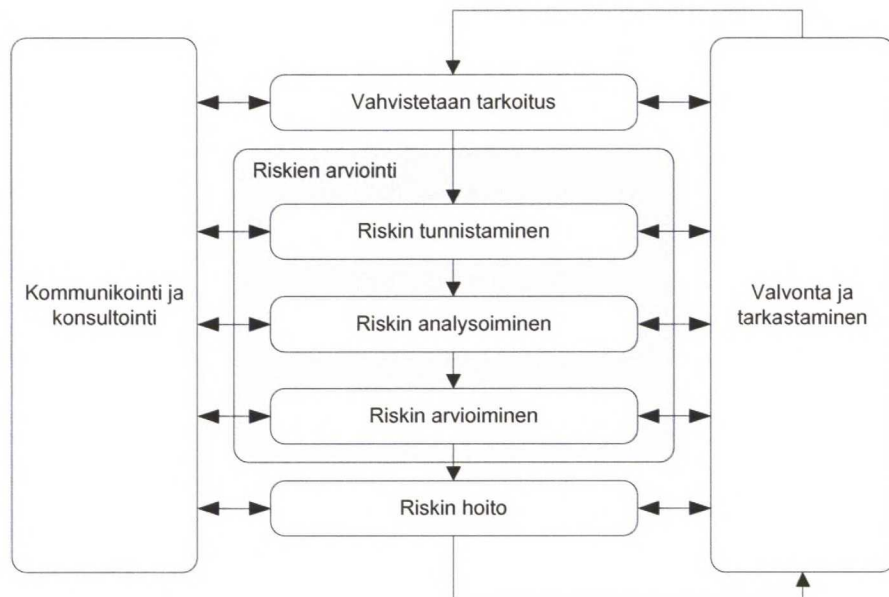
”Ihmisen luotettavuus”-termiä käytetään silloin, kun ihminen on vastuussa tai voi vaikuttaa laitteen käyttöön, kunnossapitoon ja turvallisuuteen. Tällaisissa tilanteissa ihminen on erehtyväinen ja pystyy monin eri tavoin aiheuttamaan systeemin tai sen osien vikaantumisen. Ihmisen luotettavuus täytyy huomioida läpi suunnitteluprosessin ja erityisesti silloin, kun tehdään luotettavuusanalyysyjä. Tällöin pitää muistaa, että ihmisen luotettavuuteen vaikuttaa monet asiat, kuten havainnointikyky, vaikutusmahdollisuudet ja ergonomia (IEC 62508 2010, s. 10–11 ja O'Connor 1995, s. 169)

Todennäköisyyksiä ihmisen tekemille virheille ei voida laskea, sillä ihmiset toimivat yksilöllisesti. Vaikuttavimmat tekijät sille, miten ihmisen luotettavuutta voidaan lisätä, ovat koulutus, valvonta ja motivaatio. Luotettavuusanalyysin tekevällä ryhmällä harvoin on vaikutusvaltaa ihmisiin (muihin kuin suunnittelijoihin), jotka vaikuttavat analysoitavaan systeemiin. Silti analyysin perusteella voidaan ilmoittaa päättäjille asioita, jotka tarvitsevat koulutusta, ohjeistusta tai seurantaa. (IEC 62508 2010, s. 15–16, O'Connor 1995, s. 169 ja SFS-EN ISO 9004 2009, s. 20–22)

## 2.2 Riski- ja luotettavuusarviointi

Riskien arvioimisella saadaan lisätietoa päätöksentekijöille ja vastuullisille osapuolille, kuten suunnittelijoille. Tämä tieto liittyy riskien parempaan ymmärtämiseen, joten voidaan saavuttaa parempia tuloksia. Riskien tunteminen luo pohjan monelle päätökselle ja myös, sille miten jatkossa tulisi toimia. Niinpä riskien arvioinnin lopputulos toimii perustana tuleville päätöksille. (IEC/ISO 31010 2009, s. 11, O'Connor 1995, s. 122 ja Salomäki 2003, s.89)

Luotettavuusanalyysi koostuu monesta eri vaiheesta ja tekijästä. Aluksi päätetään tilanne, jota halutaan tutkia. Lisäksi päätetään miten ja mihin tuloksia hyödynnetään. Seuraavaksi tunnistetaan riskit ja analysoidaan ne sopivalla tekniikalla. Lopuksi arvioidaan riskit ja tehdään korjaavia toimenpiteitä niiden poistamiseksi. Kuvassa 2.6 on luotettavuusanalyysin vuokaavio. (IEC/ISO 31010 2009, s. 11–16 ja O'Connor 1995, s. 122)



**Kuva 2.6** Luotettavuusanalyysin vuokaavio (muokattu) (IEC/ISO 31010 2009, s. 11)

Tutkittavat systeemit ovat usein monimutkaisia, minkä takia kommunikointi monien eri henkilöryhmien ja asiantuntijoiden kanssa voi olla tarpeen. Myös analyysin seuranta ja tarkastaminen ovat osa luotettavuusanalyysiä. Seuranta ja tarkastaminen korostuvat erityisesti silloin, kun ehdotukset korjaaviksi toimenpiteiksi on tehty. Hyvään tulokseen päästään toteuttamalla nämä korjausehdotukset ja suorittamalla



uusia luotettavuusanalyysijä. Kannattaa siis suorittaa luotettavuusanalyysi iteroiden. Näin voidaan varmistua siitä, että korjaavat toimenpiteet autoivat ja ne myös toteutettiin. (IEC/ISO 31010 2009, s. 12 ja O'Connor 1995, s. 122)

### **2.2.1 Riskien tunnistaminen**

Riskin tunnistaminen on prosessi, jossa etsitään ja tunnistetaan riski. Tunnistaminen tehdään, jotta voidaan tunnistaa, mitkä ovat riskin seuraukset ja mitkä tilanteet voivat johtaa johonkin epämieluisaan tilanteeseen. Kun riskit on tunnistettu, etsitään niille olemassa olevia seurantatapoja. Näitä voivat olla esimerkiksi suunnittelu, simulointi, ihmiset tai prosessi. (IEC/ISO 31010 2009, s. 12 ja SFS-EN 60300-3-9 2000, s. 22)

Riskien tunnistamiseen voidaan käyttää erilaisia tapoja, kuten aikaisempaan tietoon perustuvia tilastoja tai tarkistuslistoja. Myös asiantuntijoiden systemaattinen prosessin tutkiminen on toimiva tapa löytää erilaisia vikaantumismahdollisuuksia. Erilaisilla tukevilla toimilla voidaan parantaa riskien tunnistamista. Näitä tukevia tapoja ovat esimerkiksi aivorihi ja Delfoi-metodi. (IEC/ISO 31010 2009, s. 12 ja SFS-EN 60300-3-9 2000, s. 22)

### **2.2.2 Riskien analysointi**

Riskien analysoinnin tarkoituksena on ymmärtää riski. Se antaa osittain perusteet sille päätökselle, tehdäänkö mahdolliselle riskille jotain korjaavia toimenpiteitä vai jätetäänkö se huomioimatta. Analysoitaessa riskiä täytyy ymmärtää sen seuraukset. Toisaalta täytyy myös arvioida, kuinka todennäköisesti tapahtuma voi tapahtua. Analyysissä päätetään myös, kuinka helposti mahdollinen riski voidaan havaita. Näiden tietojen perusteella voidaan päättää, kuinka huomattava riski on. (IEC/ISO 31010 2009, s. 13–14)

Riskin analysoinnissa pohditaan myös syitä ja lähteitä mahdollisille riskeille. Näin siksi, että ne vaikuttavat riskin todennäköisyyteen ja sen seurauksiin. Yhdellä tapahtumalla saattaa nimittäin olla monia seurauksia moniin eri kohteisiin. Siksi on tärkeä tunnistaa kaikki mahdolliset tekijät, jotka vaikuttavat riskiin. (IEC/ISO 31010 2009, s. 13–14)



Riskejä voidaan analysoida useilla tavoilla. Ne voidaan jakaa laadullisiin, puoli-määrällisiin ja määrällisiin analyysihin. Laadullisissa analyysissä riskejä arvioidaan termein kuten ”suuri” tai ”kriittinen”. Tällöin analyysi tehdään yleensä asiantuntijoiden mielipiteiden mukaan. Puoli-määrällisissä analyysissä voidaan käyttää termien ohella myös numeroasteikoita riskien arvioimiseen. Myös määrällisissä analyysissä käytetään numeroasteikkoja. Harvoin voidaan kuitenkaan toteuttaa täysin määrällistä analyysiä, sillä lähtötiedoissa on usein puutteita. Edellä mainitut numeroasteikot voivat olla lineaarisia, logaritmisia, tai ne voivat olla jonkin kaavan mukaisia. Kun riskejä arvioidaan numeerisesti, täytyy olla selkeät ohjeet siitä, millaisia asteikkoja käytetään ja millaiset ovat erilaiset kriteerit. (IEC/ISO 31010 2009, s. 14 ja SFS-EN 60300-3-9 2000, s. 16)

### **2.2.3 Riskien arviointi**

Riskin arvioimisessa vertaillaan löydettyjä riskejä sekä keskenään, että niihin tarkoituksiin, joiden takia luotettavuusanalyysi tehtiin. Tarkoituksena on tunnistaa vakavimmat riskit ja päättää tarvitaanko niille jatkotoimenpiteitä. Tuloksena on päätös siitä, tarvitaanko korjaavia toimenpiteitä, missä järjestyksessä riskeihin puututaan ja ryhdytäänkö muihin toimenpiteisiin. (IEC/ISO 31010 2009, s. 15–16)

Perusteet päätöksille riskeihin suhtautumisesta on päätetty jo luotettavuusanalyysiä ennen. Tällöin määriteltiin analyysille tavoite, johon riskejä täytyy vertailla. Tästä johtuen analyysin vakavimmat riskit eivät välttämättä olekaan oikeasti vakavimpia. Pohjimmaisena syynä jatkotoimenpidepäätökselle on usein kuitenkin raha ja kustannukset. (IEC/ISO 31010 2009, s. 15–16)

### **2.2.4 Luotettavuustyökalun valinta**

Luotettavuusanalyysissä voidaan joutua tekemään eri laajuisia analyyskejä erilaisilla tarkkuuksilla ja käyttäen eri työkaluja vaihdellen yksinkertaisesta monimutkaiseen. Analyysityökalun valintaan vaikuttaa monia asioita. Niinpä joissain tilanteissa voidaan joutua tekemään kompromissi sen suhteen, mitä luotettavuustyökalua käytetään. Liitteessä 1 esitetään tässä tutkimuksessa käsiteltyjen luotettavuustyökalujen valintaan vaikuttavia ominaisuuksia. (IEC/ISO 31010 2009, s. 17–18)

Päätettäessä tehdä luotettavuusanalyysi, päätetään myös mihin tavoitteisiin ja tuloksiin sillä pyritään. Nämä tavoitteet ovat tärkeä asia ohjaamaan työkalun valinnassa. Myös se, millaisia tuloksia päätöksentekijät tarvitsevat, vaikuttaa luotettavuustyökalun valintaan. (IEC/ISO 31010 2009, s. 17–18)

Edellisten asioiden lisäksi resurssit ovat tärkeä asia työkalun valinnassa. Analyysin suorittavalla ryhmällä ja heidän asiantuntijuudellaan on suuri painoarvo. Resursseista myös aika ja raha vaikuttavat paljon siihen, mihin työkaluun päädytään. Huomioitava resurssi ovat lähtötiedot. Työkalut, joilla tehdään määrällisiä analyysejä, tarvitsevat lähtötiedoiksi todennäköisyyksiä ja muita tilastoarvoja. Myös muihin luotettavuusanalyysihin tarvitaan lähtötietoja, esimerkiksi asiantuntijoiden kokemuksen. (IEC/ISO 31010 2009, s. 12–13, 18)

Monissa luotettavuustyökaluissa on erilaisia epävarmuustekijöitä. Epävarmuus tulee useissa tapauksissa siitä, että luotettavuusanalyysi pohjautuu ainoastaan asiantuntijoiden mielipiteisiin. Muita epävarmuustekijöitä ovat vähäiset lähtötiedot tai niiden epäluotettavuus. Vaikka lähtötietoja olisikin hyvin saatavilla, on ne voitu tarkoittaa toisenlaiseen käyttöön, eivätkä näin ollen olekaan optimaalista tietoa. Tämän takia tuloksia tarkastellessa on syytä keskustella lähtötiedoista myös päätöksentekijöiden kanssa. (IEC/ISO 31010 2009, s. 18–19 ja SFS-EN 60300-3-9 2000, s. 18)

Luotettavuustyökalujen monimutkaisuuksissa on paljon eroja. Osaa niistä on helppo käyttää ja osan käyttö vaatii erillistä koulutusta. Analyysin tuloksen monimutkaisuus vaikuttaa työkalun valintaan. Toisilla luotettavuustyökaluilla voidaan tutkia luotettavuutta komponenttitasolla ja toisilla voidaan vain eritellä tuotteen luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Näiden lisäksi myös riskien tyyppi ja laajuus vaikuttavat valintaan. Niinpä täytyy olla jo jonkinlainen mielikuva siitä, millaisiin tilanteisiin analyysin aikana voidaan joutua. (IEC/ISO 31010 2009, s. 18–19)

Koska tuotteet ovat usein pitkäikäisiä, täytyy huomioida se, missä vaiheessa elinkaarta luotettavuusanalyysi tehdään. Osa työkalusta sopii paremmin konseptien vertailuun ja osalla voidaan tutkia luotettavuutta huollon näkökulmasta. Joitain työkaluja voidaan hyödyntää läpi koko elinkaaren. Tästä johtuen on tärkeää, että

analyysin tuloksia voidaan myös päivittää, mikä ei kaikkien luotettavuustyökalujen yhteydessä ole mahdollista. (IEC/ISO 31010 2009, s. 19–20 ja SFS-EN 60300-3-9 2000, s. 20)

### 3 LUOTETTAVUUSTYÖKALUJA

Tässä luvussa esitetään erilaisia laadullisia ja puoli-määrällisiä luotettavuustyökaluja, niiden etuja ja haittoja. Tämän lisäksi kerrotaan myös niiden käyttötavoista. Jotta näistä työkaluista tulisi parempi käsitys, on osasta mukana myös lyhyt esimerkki. Tutkimuksen työkalut valittiin perustuen kirjallisuuteen, luotettavuustyökalujen ominaisuuksiin ja ABB:n aikaisempiin kokemuksiin.

#### 3.1 Aivoriihi

Aivoriihi on yleisin ja yksi vanhimmista käytetyistä ideointityökaluista. Monen luovan ratkaisumenetelmän taustalla on aivoriiehen perustuva ideointi. Myös monet luotettavuustyökalutkin vaativat avoimen ja luovan ajatusten vaihdon.

##### 3.1.1 Tausta

Aivoriihi on yleensä vapaata ja kannustavaa keskustelua ja ideointia jonkin määrätyn asian ympäriltä. Tällä metodilla on tarkoitus saada nopeasti paljon erilaisia ideoita. Aivoriiehtä käytetään yleensä perinteiseen tapaan, eli puhutaan avoimesti kaikkien kuullen ja kirjataan ehdotuksia ylös. Aivoriiehestä on myös monia variaatioita. Näistä ehkä tunnetuin on galleria-metodi, jossa ajatukset kirjataan erillisille tauluille, joita sitten täydennetään omien ja muiden ehdotusten pohjalta. (IEC/ISO 31010 2009, s. 27 ja Oberschmid 2007, s. 5.1)

Aivoriiehen toiminta perustuu muutamaan tärkeään ajatukseen. Tärkein on se, ettei kriittisyys ole sallittua ajatustenluonnissa. Jotta lopulta saataisiin hyviä ideoita, pitää niitä aluksi olla paljon. Ideoita on hyvä keksiä muiden ehdotuksien pohjalta ja kaikkein vilsimmätkin ideat on hyvä tuoda julki. Osallistujien on hyvä muistaa avoin ja luova ajattelu aivoriiehessä. (Oberschmid 2007, s. 5.1–5.2)

Luotettavuustyökaluna aivoriiehen tarkoitus on löytää vikaantumistavat, riskit ja korjausehdotukset näihin epäkohtiin. Yleensä se sekoittuu muihin luotettavuustyökaluihin, eikä sitä ajatella omanaan. Tämä onkin hyvä, sillä usein sitä ei ole tarpeen erottaa analyysiprosessista. (IEC/ISO 31010 2009, s. 27)



### 3.1.2 Prosessi

Prosessin aluksi kootaan ryhmä joka tuntee kohteen, johon aivoriihen käyttö liittyy. Osallistujiksi on hyvä valita asiantuntijoita ja henkilöitä, jotka eivät tunne asiaa yhtä hyvin. Ryhmä päättää yhdessä analyysin vetäjän kanssa tavoitteen. (IEC/ISO 31010 2009, s. 27)

Aluksi osallistujat miettivät itsenäisesti ideoita ja kirjaavat ne ylös itselleen. Tähän voi käyttää ajasta riippuen muutamasta minuutista 15 minuuttiin. Seuraavaksi aletaan kertoa omia ideoita. Tässä vaiheessa kritiikki on kiellettyä. Uusia ideoita luodaan samalla kun kuullaan muiden ajatuksia. (IEC/ISO 31010 2009, s. 27 ja Oberschmid 2007, s. 5.2–5.3)

Ideoiden kertomisen jälkeen niistä rajataan mahdottomat pois. Näin jäljelle jäävät vain ne, joita ryhmä pitää tarpeellisina. Riippuen ajanhetkestä koska aivoriihtä käytetään, niin tämän luotettavuuskalun tuloksena voi esimerkiksi olla lista vioista ja niiden korjausehdotuksista. (IEC/ISO 31010 2009, s. 28)

### 3.1.3 Edut ja haitat

Aivoriihen yksi parhaimmista puolista on sen panostaminen mielikuvitukseen, jotta ongelmia ja ratkaisuja löydetäisiin. Sen järjestäminen ja aloittaminen on yleensä nopeaa, eikä vaadi mitään suurempia valmisteluja. (IEC/ISO 31010 2009, s. 28)

Taustatietojen puute ja asiantuntemattomuus voi johtaa siihen, ettei parasta tulosta saavuteta. Tämän lisäksi analyysin vapaus saattaa aiheuttaa sen, ettei kaikkia mahdollisia ongelmia löydetä. Kaikkien osallistujien ajatukset eivät välttämättä tule julki, sillä heidän ehdotukset saattavat jäädä dominoivimpien henkilöiden takia kuulematta. (IEC/ISO 31010 2009, s. 28)

## 3.2 Lohkokaavio

Systeemit koostuvat yleensä monista osista, joilla on kuitenkin selkeät riippuvuudet toisiinsa nähden. Monimutkaiset systeemit koostuvat usein hierarkkisesti monesta eritasosta tai alisysteemistä. Tällainen systeemi on usein järkevää piirtää yksinkertaistettuna lohkokaaviona halutulla tarkkuudella.

### 3.2.1 Tausta

Lohkokaavioanalyysi on looginen tapa tutkia systeemin luotettavuutta. Luotettavuuden näkökulmasta tehtävä lohkokaavio ei välttämättä ole samanlainen kuin toiminnallinen lohkokaavio. Lohkokaavioin tekeminen on tärkeä toimenpide, kun aloitetaan systeemin analysointi. Se näyttää tutkittavasta kohteesta hyvän kokonaiskuvan. Lisäksi se helpottaa määrittämään niitä osa-alueita, jotka tarvitsevat parannuksia. (Lähteenmäki 1998, s. 13 ja O'Connor 1995, s. 133)

Luotettavuuslohkokaavion luotettavuusanalyysi perustuu lohkojen toimintojen todennäköisyyksiin. Lähtötietoina tarvitaan siis lohkojen luotettavuus. Nämä lohkot voivat olla halutusta tarkkuudesta riippuen komponentteja tai alisysteemeitä. Yleensä lohkokaaviossa komponentit ovat sekaisin sekä rinnan että sarjassa ja kun systeemistä tulee monimutkaisempi ne voivat olla yhdistettyinä. Jos systeemi on suuri, voi olla järkevää muodostaa siitä erillisiä lohkokaavioita luotettavuuden ja laskettavuuden helpottamiseksi. (O'Connor 1995, s. 133 ja Yang 2007, s. 66–67)

### 3.2.2 Edut ja haitat

Suurin lohkokaaviolla saavutettava etu on, että sillä voidaan yksinkertaistaa monimutkaistakin systeemiä. Lohkokaavion avulla saadaan käytyä läpi kattavasti koko systeemi. Yksittäistä osaa on helppoa keskittyä tutkimaan, koska systeemi on jaettu lohkoihin. Lohkokaavion esittäminen helpottaa myös systeemistä puhumista, sillä silloin on parempi käsitys asioiden yhteyksistä. Jos tiedossa on lohkojen todennäköisyydet, voidaan koko kaavion todennäköisyys myös laskea helpoilla laskutoimituksilla. (Laatuakatemia)

Harvoin on saatavilla lähtötietoina kaikkien lohkojen todennäköisyyksiä, minkä takia koko systeemin todennäköisyyttä ei välttämättä voida tarkasti laskea. Lisäksi epävarmuutta korostaa se, että todellisuudessa lohkojen väliset yhteydet eivät yleensä ole niin suoraviivaisia kuin lohkokaaviossa ilmenee. Vaikka lohkokaaviosta saakin hyvän yleiskäsityksen systeemistä, niin lohkojen tarkkaa rakennetta niistä ei selviä. (Yang 2007, s. 67)

### 3.2.3 Lohkot sarjassa ja rinnan

Systeemi on sarjassa, jos yhden tai useamman komponentin vikaantuminen vioittaa koko järjestelmän. Toisin sanoen kaikkien systeemin komponenttien täytyy toimia, jotta systeemi toimii. Sarjassa olevien komponenttien luotettavuus lasketaan komponenttien luotettavuuksien tulona:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i = \Pr(E_1) \Pr(E_2) \dots \Pr(E_n), \quad (4)$$

jossa  $R$  on koko systeemin luotettavuus,  
 $R_i$  on i:nneen komponentin luotettavuus ja  
 $E$  on tapahtuman toiminta.

Jos kaikki sarjassa olevat komponentit ovat samanlaisia, niin kokonaisluotettavuus lasketaan:

$$R = R_0^n, \quad (5)$$

jossa  $R_0$  on komponenttien luotettavuus. (IEC 61078 2006, s. 25, 51)

Systeemin komponentit ovat rinnakkain, jos systeemin vikaantuminen vaatii kaikkien komponenttien vikaantumisen. Systeemi toimii siis vielä silloin kuin yksi tai useampi komponentti on vikaantunut. Rinnan olevien komponenttien luotettavuus lasketaan niiden epäluotettavuuden kautta. Tämä lasketaan vähentämällä todennäköisyydestä yksi komponenttien luotettavuus:

$$F = \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = (1 - \Pr(\bar{E}_1))(1 - \Pr(\bar{E}_2)) \dots (1 - \Pr(\bar{E}_n)), \quad (6)$$

jossa  $F$  on systeemin epäluotettavuus,  
 $R_i$  on i:nneen komponentin luotettavuus ja  
 $E$  on tapahtuman toiminta.

Jotta lopullinen luotettavuus saadaan laskettua, täytyy epäluotettavuus  $F$  muuttaa luotettavuudeksi  $R$  :

$$R = 1 - F = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) . \quad (7)$$

Jos kaikki rinnan olevat komponentit ovat samoja, kokonaisluotettavuus lasketaan:

$$R = 1 - (1 - R_0)^n , \quad (8)$$

jossa  $R_0$  on komponenttien luotettavuus. (IEC 61078 2006, s. 27, 51)

### 3.2.4 Esimerkki – Auto

Auton luotettavuuslohkokaavio voidaan tehdä halutusta tarkkuudesta riippuen vaikka ainoastaan neljällä loholla. Jos auto purettaisiin kokonaisuudessaan lohkoihin, nousisi niiden määrä yli 12 000. Auton tapauksessa yleensä ajatellaan, että korkeamman hierarkia lohkoissa lohkot ovat sarjassa (kuva 3.1), jolloin yhden lohkon vikaantuminen johtaa koko tuotteen vikaantumiseen.



**Kuva 3.1** Auton luotettavuuslohkokaavio (muokattu) (Yang 2007, s. 67)

Lohkoja voidaan myös pilkkoa pienempiin alikokoonpanoihin, kuten kuvassa 3.2 esitetään voimansiirron alikokoonpanot. Jos lohkojen pilkkomista jatketaan, päästään lopulta komponenttitasolle. Auton luotettavuus voidaan laskea luvun 3.2.3 kaavojen mukaan, jos kaikkien lohkojen todennäköisyydet tunnetaan.



**Kuva 3.2** Auton voimansiirron alikokoonpanot (muokattu) (Yang 2007, s. 67)

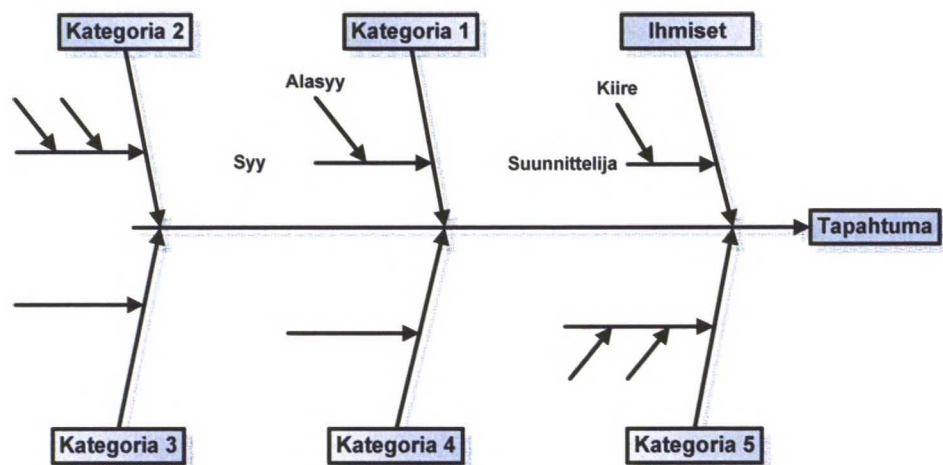


### 3.3 Syy-seuraus-analyysi (Ishikawa diagram)

Vikaantumisella voi olla monta erilaista tekijää, jotka aiheuttavat siihen johtavan tapahtuman. Syy-seuraus-analyysissä nämä tekijät ryhmitellään erilaisten kategorioiden alle. Tämä analyysi tunnetaan myös nimillä syy-seuraus-kaavio (Cause-and-Effect diagram), kalanruotokaavio (Fishbone diagram) tai keksijänsä mukaan Ishikawa-diagrammi (Ishikawa diagram).

#### 3.3.1 Tausta

Syy-seuraus-analyysi on järjestelmällinen tapa tutkia syitä, miksi jokin vikaantuminen tai epämieluisa tai mieluisa tapahtuma tapahtuu. Tapahtuma jota syy-seuraus-analyysillä tutkitaan voi olla negatiivinen eli ongelma tai positiivinen eli tavoite. Tällä luotettavuustyökalulla kirjataan kaikki ne syyt, jotka voivat johtaa ennalta määrättyyn tapahtumaan. Nämä syyt ryhmitellään erilaisten suurempien kategorioiden alle niiden luonteen mukaan. Usein syy-seuraus-analyysin tulokset esitetään kalanruotokaaviona, mistä yksi sen kutsumanimistäkin tulee. Kuvassa 3.3 on esimerkki syy-seuraus-kaaviosta. (IEC/ISO 31010 2009, s. 56)



**Kuva 3.3** Esimerkki syy-seuraus-analyysin kalanruotokuvaajasta

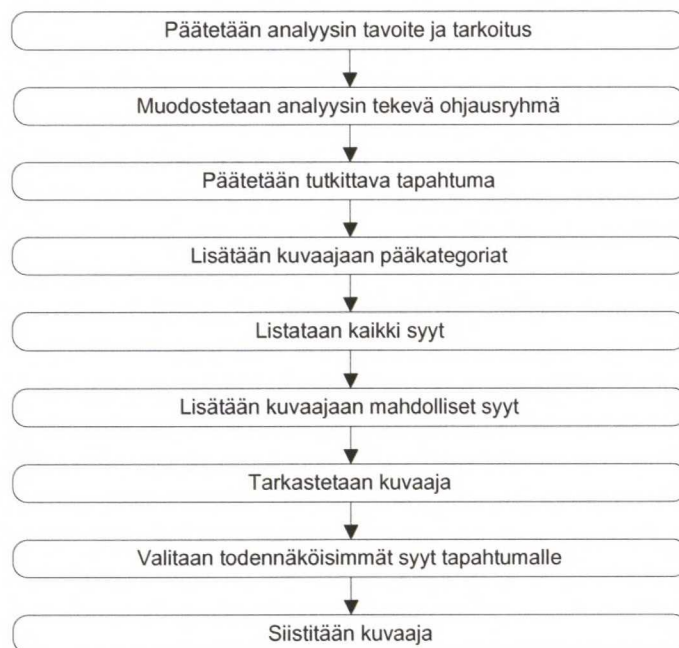
Tällä analyysillä ei saada selvitettyä mitään tiettyä tulosta sille, miksi vikaantuminen on tapahtunut. Jos halutaan selvittää tarkasti, mikä syy johtaa vikaantumiseen, täytyy käyttää syy-seuraus-analyysin lisäksi myös muita luotettavuustyökaluja. Koska analyysissä mietitään monia täysin erityyppisiä tekijöitä, tulee tapahtumaa harkittua kaikista mahdollisista näkökulmista. Tämä piirre tekee analyysistä varsin kattavan ja

todennäköisesti se kattaa lähes kaikki mahdolliset vikaantumissytyt. (IEC/ISO 31010 2009, s. 56)

Lopullisen kuvaajan perusteella nähdään ne tapaukset, joita on hyvä testata tai tutustua niihin muuten saatavilla olevan aineiston perusteella. Yleisesti tätä analysointityökalua on järkevintä käyttää ennen muita analyyskejä. Tällä tavoin saadaan laajempi mielikuva mahdollisista syistä, jotka johtavat määrättyyn tapahtumaan. (IEC/ISO 31010 2009, s. 56)

### 3.3.2 Prosessi

Analyysin aluksi kootaan ryhmä asiantuntijoita. Näiden tulisi tuntea analysoitava tuote hyvin. Asiantuntijoiden oma tieto ja kokemus ovat tärkeimmät lähtötiedot. Tämän lisäksi analyysin lähtötietoina on hyvä olla suunnitelmia, vaatimuksia, tietoa edellisistä versioista ja testituloksia. Kaavio koko prosessista on kuvassa 3.4. (IEC/ISO 31010 2009, s. 57)



**Kuva 3.4** Syy-seuraus-analyysin prosessi

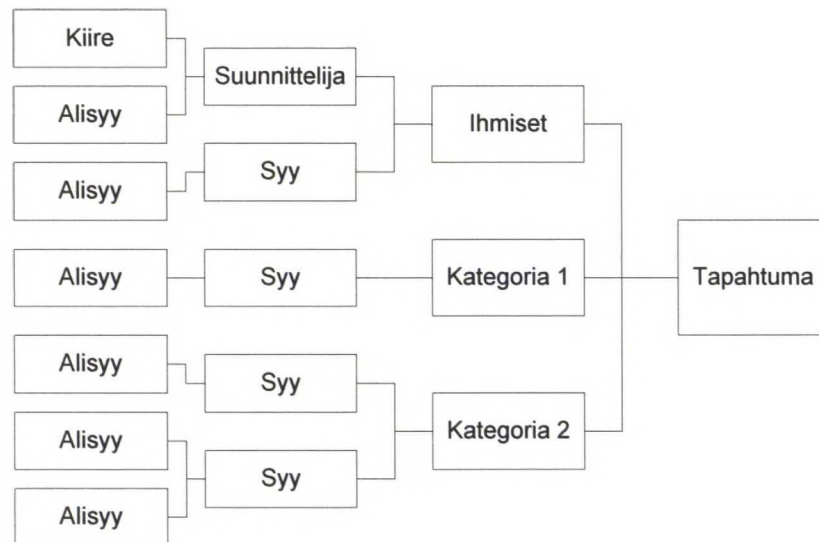
Ryhmä päättää analyysin alussa mitä tapahtumaa (Effect) aletaan tutkia. Tämä sijoitetaan kalanruotokuvaajan oikeaan laitaan sen kuvitteellisen pääkohdalle. Tapahtuma voi olla joko positiivinen tai negatiivinen, riippuen analyysin tarkoituksesta. (IEC/ISO 31010 2009, s. 57)

Kuvaajaan lisätään kalanruodot eri kategorioiden mukaan. Kategoriat vaihtelevat riippuen tapahtumasta ja myös siitä, mitä analyysillä halutaan selvittää. Yleisimmin käytetyt kategoriat ovat: ihminen, ympäristö, välineet, prosessi, tieto, materiaali. Yleensä kategorioita yhdessä kuvaajassa on neljästä kuuteen erilaista, näiden määrä vaihtelee tapahtumaan johtavien syiden mukaan. (IEC/ISO 31010 2009, s. 57 ja Laatuakatemia)

Syyt voidaan ensin kirjata erillisiin listoihin, josta valitaan vain mahdolliset ja järkevät ajatukset kirjattavaksi kuvaajaan. Kaikki syyt tulisi kirjata eri kategorioiden alle. Näiden päähaarojen alle voidaan myös luoda nimettyjä sivuhaaroja, joihin sijoitetaan alasyitä. Syitä voidaan selvittää kysymällä: Mitä?, Miksi?, Missä?, Kuka? tai Kuinka? (IEC/ISO 31010 2009, s. 57 ja Salomäki 2003, s. 346)

Koko kuvaaja tarkastetaan sitten, kun siihen on kirjattu kaikki mahdolliset syyt. Kuvaajan tulee olla johdonmukainen ja sen tulee täyttää määritetyt vaatimukset. Tässä vaiheessa tarkastetaan myös se, että kaikki syyt todella vaikuttavat analysoitavaan tapahtumaan. Asiantuntijat jotka tekivät analyysin valitsevat todennäköisimmät syyt sille miksi tapahtuma tapahtuu. (IEC/ISO 31010 2009, s. 57)

Tuloksena saadaan selkeästi luettava kuvaaja, kuten kuvassa 3.3 esitetään. Kuvaajana käytetään yleensä kalanruotokaaviota, mutta joissain tilanteissa käytetään myös puukuvaajaa, joka muistuttaa vikapuuanalyysin kuvaajaa (vrt. luku 3.5). Puukuvaaja esitetään syy-seuraus-analyysissä yleensä poikittain oikealta vasemmalle. Esimerkki syy-seuraus-analyysin puukuvaajasta on kuvassa 3.5. (IEC/ISO 31010 2009, s. 57)



**Kuva 3.5** Syy-seuraus-analyysin puukuvaaja (vrt. kuva 3.3)

Kuvaaja on yleensä laadullinen, mutta se voidaan myös muuttaa määrälliseksi. Tällöin päätapahtuman todennäköisyydeksi asetetaan yksi ja se jaetaan sitten jokaiselle syyille. Tällä tavoin saatava todennäköisyys toimii hyvin suuntaa-antavana, sillä kuvaajan arvot ovat usein arvioita, eikä tuloksiin siten voi täysin luottaa. (IEC/ISO 31010 2009, s. 58)

Analyysin perusteella saaduille tapahtuman syille kehitetään korjaavia toimenpiteitä. Näillä pyritään poistamaan ainakin ne vakavimmat tekijät, jotka asiantuntijaryhmä on määritellyt analyysin loppuvaiheessa. Kun ehdotukset on tehty, dokumentoidaan koko analyysiprosessi. Dokumenttiin tulisi liittää itse kuvaajan lisäksi tarvittavat taustatiedot, päätökset ja korjaavat toimenpiteet sekä niiden seuranta.

### 3.3.3 Edut ja haitat

Syy-seuraus-analyysi on järjestelmällinen tapa tutkia tapahtuman syitä. Koska tätä luotettavuustyökalua käytetään asiantuntijaryhmässä, on tulos usein parempi verrattuna yksittäisen henkilön tietämykseen. Tällä tekniikalla saadaan selvitettyä juurisyyt, eli pohjimmaisat syyt tapahtuman takana. Analyysin tulos ohjaa myös sen lukijoita tietyille ongelma-alueille. Näin nähdään mistä asioista pitäisi saada lisätietoa. Syy-seuraus-analyysillä on mahdollista löytää prosessissa tapahtuvia vikoja. (IEC/ISO 31010 2009, s. 56, 58)



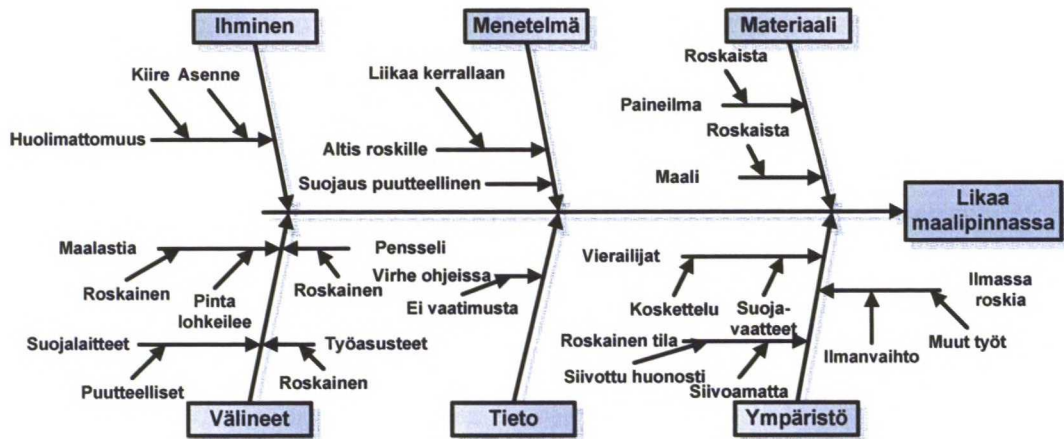
Käytettäessä useata kuvaavaa kategoriaa saadaan syyt järjesteltyä ja yhdistettyä hyvin informatiivisesti. Tämän lisäksi analyysin järjestelmällisyys takaa myös lopputuloksen selkeyden. Tästä hyvästä henkilö joka ei ole ollut mukana analyysin tekemisessä on helppo lukea kalanruotokaaviota. Positiivista asiaa tutkittaessa saadaan yleensä enemmän innokkaita osallistujia. Tämän lisäksi he osallistuvat usein aktiivisemmin analyysin tekemiseen. (IEC/ISO 31010 2009, s. 56, 58)

Syy-seuraus-analyysi ei ole yksin käytettynä täydellinen luotettavuustyökalu. Se vaatii muita työkaluja käytettäväksi samanaikaisesti kuten vika- ja vaikutusanalyysin. Syy-seuraus-analyysi toimii ennemmin aivoriihen esitystapana kuin itsenäisenä luotettavuustyökaluna. (IEC/ISO 31010 2009, s. 58)

Analyysiä tekevältä ryhmältä saattaa puuttua tarvittava asiantuntemus. Tästä syystä kuvaajaan ei välttämättä päädy kaikki kriittiset syyt. Syiden jako kategorioihin voi taas johtaa siihen, ettei kaikkia syiden keskeisiä riippuvuuksia harkita riittävästi. (IEC/ISO 31010 2009, s. 58)

### **3.3.4 Esimerkki – Likaa maalipinnassa**

Esimerkissä on esitetty syy-seuraus-analyysin tulos, jossa etsittiin syitä sille, miksi maalipinnassa voi olla likaa. Analyysin tuloksena muodostettu kuvaaja on kuvassa 3.6. Tapahtumaksi on päätetty: Likaa maalipinnassa. Kuvaajassa on käytetty kuutta eri kategoriaa, joihin syyt ovat jakautuneet tasaisesti. Lähes jokaisella syyllä on myös tarkentavia alasyitä. Kuvaajasta selviää, että mahdollisia syitä likaantumiselle on useita.



Kuva 3.6 Syy-seuraus-analyysin esimerkki: likaa maalipinnassa (Salomäki 2003, s. 348)

### 3.4 Vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA)

Vika- ja vaikutusanalyysi on yksi yleisimmistä ja tehokkaimmista luotettavuustyökaluista. Se on ennakoiva analyysi, joka etenee alhaalta ylöspäin (Bottom-Up). Vika- ja vaikutusanalyysi (Failure Mode and Effects Analysis) eli lyhyemmin VVA on yleisimmin tunnettu englanninkielisellä lyhenteellä FMEA. Se perustuu vanhaan MIL-STD-1629-standardiin. Nykyään analyysille on tehty uusi standardi (IEC 60812 Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis), jota käytetään paljon sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa. Koska tätä luotettavuustyökalua käytetään myös paljon autoteollisuudessa, on tällekin teollisuusalueelle tehty oma standardi SAE J1739. (O'Connor 1995, s. 157 ja Yang 2007, s. 195)

#### 3.4.1 Tausta

Analyysi voidaan tehdä esimerkiksi laitteistoille, prosesseille tai toiminnoille. Toiminnoille analyysi tehdään yleensä suunnittelun alussa, kun kaikkia tarvittavia tietoja ei ole vielä saatavissa. Analyysin tuloksena on lista vikaantumistavoista ja niiden vaikutuksista. Vikoja arvioidaan niiden vakavuuden (Severity), toteutumisen (Occurrence) ja ilmenemisen (Detection) mukaan. Vikaantumistavat luokitellaan niiden vakavuuden eli riskiluvun (Risk Priority Number, RPN, kutsutaan myös nimillä riskitulo tai riskin priorisointinumero) mukaan. Vika- ja vaikutusanalyysi

voidaan laajentaa vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysiksi, jolloin mukaan lasketaan myös komponenttien kriittisyys.

Vika- ja vaikutusanalyysissä tutkitaan systeemin ja sen alisysteemien kaikki komponentit ja miten ne voivat vikaantua ja mitkä niiden seuraukset ovat. Analyysin tulokset kirjataan kaikki samaan taulukkoon. Jos laite on monimutkainen tai toimii monessa osassa, voi olla tarpeen tehdä erilliset analyysit jokaiselle tilanteelle. Vika- ja vaikutusanalyysillä voidaan löytää myös yhteisvikoja (ks. luku 3.5.1). Esimerkki FMEA-pohjasta on taulukossa 3.1. (IEC 60812 2006, s. 30).

**Taulukko 3.1** Vika- ja vaikutusanalyysin pohja (muokattu) (Stamatis 1995, s. 34)

Osa	Vikaantumis-tapa	Vikaantumis-vaikutukset	Syy vikaantumis-tavalle	Seuranta-tavat	Kriittisyys	Todennäköisyys	Havaittavuus	RPN	Suositeltavat toimenpiteet	Tehdyt toimenpiteet	Päivitetyt			
											Kriittisyys	Todennäköisyys	Havaittavuus	RPN

Vika- ja vaikutusanalyysin käytössä ajoitus on tärkeää. Työkalu tulee ottaa käyttöön heti kehityksen alussa. Tässä vaiheessa on vielä mahdollista vaikuttaa suunnitelmiin ja muutosten tekeminen on halvempaa kuin jo valmiille tuotteelle. Analyysiä tulee käyttää iteratiivisesti, eli muutosten jälkeen tulee tehdä uusi tai ainakin päivittää vanhaa analyysiä. Jos analyysiä päivitetään muutosten takia, täytyy kaikkia päivittämättömiä komponentteja käyttää kuten ennen muutosta. Jos komponenttien toiminta tai käyttötarkoitus muuttuu, muuttuu niiden luotettavuuskin. Tästä syystä joudutaan analyysit tekemään uudestaan muuttuneiden komponenttien osalta. (IEC 60812 2006, s. 8, 10 ja O'Connor 1995, s. 160)

### 3.4.2 Analyysityypit

Yleisimmät vika- ja vaikutusanalyysityypit ovat systeemi, suunnittelu ja prosessi. Muita vähemmän käytettyjä analyysityyppejä on palvelu ja ohjelma. Analyysin tarkoituksesta riippuen valitaan haluttu tyyppi, mutta yleisesti kaikki edellä luetellut analyysityypit ovat samantyyllisiä. (IEC 60812 2006, s.12 ja Yang 2007, s. 196)

Systeemille tehtävä analyysi (System FMEA) tunnetaan myös konseptille tehtävänä analyysinä (Concept FMEA). Tämä tyyppi on korkeimman tason analyysi, jonka



tarkoituksena on tutkia ja estää vikaantumisia liittyen teknologiaan ja konseptiin. Analyysi tulee tehdä heti kun systeemin suunnitelmat ovat valmiina, sillä kuten edellä on jo todettu, on tämä halvin vaihe tehdä muutoksia. (Yang 2007, s. 196)

Systeemi vika- ja vaikutusanalyysillä löydetään systeemissä ja sen alisysteemeissä olevia vikaantumismahdollisuuksia. Lisäksi se helpottaa tutkimaan systeemille annettujen vaatimusten täyttymisiä. Jos analyysi tehdään kahdelle erilaiselle konseptille, niiden tulokset ohjaavat konseptien valinnassa. Analyysin tuloksia voidaan myös hyödyntää testaustauksen suunnittelussa. Ennen kaikkea taustalla on kuitenkin asiakastyytyväisyys, johon pyritään vaikuttamaan heti suunnittelun alussa. (Yang 2007, s. 196)

Suunnittelulle tehtävä analyysi (Design FMEA) on yleisin vika- ja vaikutusanalyysityyppi. Tämän tarkoituksena on löytää kaikki mahdolliset viat ja vikaantumismekanismit komponentti- ja suunnittelutasolla. Näiden pohjalta arvioidaan vioista johtuvat riskit ja tehdään ehdotukset korjaaviksi toimenpiteiksi. Analyysi tulee pyrkiä tekemään jo ennen kuin mahdolliset vikaantumiset suunnitellaan tuotteeseen. Todellisuudessa analyysi tehdään yleensä kuitenkin vasta sen jälkeen kun ensimmäinen versio tuotteesta on suunniteltu. (Yang 2007, s. 196)

Suunnittelulle tehtävä vika- ja vaikutusanalyysin tärkein tarkoitus on vähentää vikaantumismahdollisuuksia. Tämä saavutetaan kun analyysiä käytetään suunnittelun alusta asti tehokkaasti ja iteratiivisesti. Parannusehdotukset vaativat seuranta ja toteuttamisen jälkeen analyysi vaatii päivittämistä. Suunnittelulle tehtävä vika- ja vaikutusanalyysi helpottaa tarkastelemaan tuotetta objektiivisesti toiminnallisuuden, valmistettavuuden, huollettavuuden, ympäristön ja eri suunnitteluvaihtoehtojen näkökulmasta. Tällä analyysityypillä pystytään myös vertailemaan eri konsepteja. Analyysin tulosta voidaan käyttää myös lähtötietona prosessille tehtävässä vika- ja vaikutusanalyysissä. (Yang 2007, s. 196–197)

Kuten edellisissäkin analyysityypeissä myös prosessille tehtävässä vika- ja vaikutusanalyysissä (Process FMEA) pyritään löytämään mahdolliset vikaantumistavat. Analyysillä saadaan parhaat tulokset, jos se tehdään ennen prosessin aloitusta, sillä näin voidaan tehdä korjaavat toimenpiteet ennen



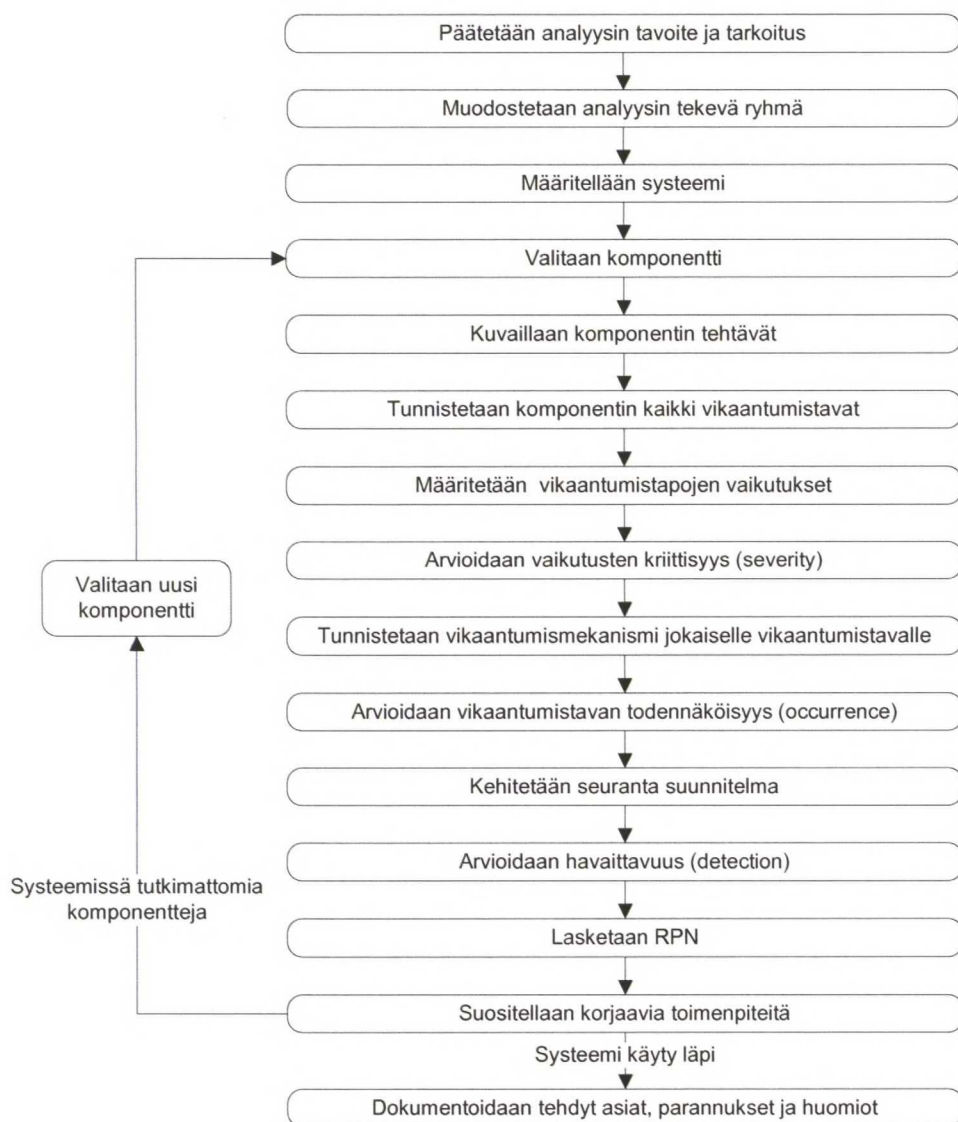
mahdollisten riskien ilmaantumista. Koska prosesseihin vaikuttaa usein monia eri asioita, sen analysointi kannattaa suorittaa monessa vaiheessa. Tästä syystä prosessin vika- ja vaikutusanalyysi voi viedä enemmän aikaa kuin systeemille tai suunnittelulle tehtävä analyysi. (Yang 2007, s. 197)

Prosessin analyysistä löydetään yleensä vikaantumistapoja ja -mekanismeja, jotka riippuvat tuotteesta tai prosessista. Nämä ohjaavat prosessin valvontaa tarvituille osaluueille. Analyysin tuloksilla ja erityisesti korjaavilla toimenpiteillä voidaan vaikuttaa asiakastyytyväisyyteen, sillä näin prosessista syntyy laadukkaampia ja luotettavampia tuotteita. (Yang 2007, s. 197)

### 3.4.3 Prosessi

Aluksi tulee määritellä, miksi analyysi tehdään. Analyysi voidaan tehdä esimerkiksi liittyen suunnitteluun, turvallisuuteen, korjauskustannuksiin, käytettävyyteen tai tarkoituksena voi olla tutkia vain erilaisia vikaantumistapoja. Tämä on tärkeä vaihe, sillä esimerkiksi korjauskustannusten näkökulmasta jonkun vian kriittisyys voi olla matalampi kuin käytettävyyden näkökulmasta. (O'Connor 1995, s. 160 ja IEC/ISO 31010 2009, s. 47)

Analyysi on tehokkaimmillaan silloin, kun sen tekijät tuntevat systeemin jo entuudestaan. Valitaan siis ryhmä asiantuntijoita. Oman tiedon ja kokemuksen lisäksi kaikki ylimääräinen materiaali on eduksi analyysissä. Esimerkiksi tarkka tuntemus komponenteista ja niiden vikaantumisista on usein tarpeen. Jotta analyysi olisi myös ajallisesti tehokas, on hyvä olla mukana toiminnallinen kaavio. Kuvassa 3.7 esitetään vika- ja vaikutusanalyysin prosessi. (IEC 60812 2006, s. 11–12)



**Kuva 3.7** Vika- ja vaikutusanalyysin prosessi (muokattu) (Yang 2007, s. 198) (IEC 60812 2006, s. 20)

Systeemi pitää määrittää ja sen toiminta tulee ymmärtää. Tärkeää on määrittää systeemin rajat, ympäristö ja kaikki systeemiin vaikuttavat asiat. Joillekin systeemeille rajat saattavat olla itsestään selviä, mutta monille se voi olla tarpeen rajata tarkasti. Nämä asiat helpottavat mahdollisesti viereisille systeemeille tehtäviä analyysyjä. (IEC/ISO 31010 2009, s. 477, IEC 60812 2006, s. 12–13 ja Yang 2007, s. 198, 200)

Systeemi jaetaan analyysityypistä riippuen alisysteemeihin, moduuleihin tai komponentteihin ja tutkitaan kaikki niiden tarkoitukset ja toiminnot. Niille tunnistetaan kaikki vikaantumismahdollisuudet. Vikaantumisella tarkoitetaan sellaista tilannetta, jossa kyseinen asia ei enää suoriudu sille suunnitelluista

tehtävistä. Vikaantuminen voi olla seuraus jostain yksittäisen asian vikaantumisesta tai jonkun suuremman kokonaisuuden vikaantumisesta. (Yang 2007, s. 200)

Seuraavaksi tunnistetaan vikaantumisten aiheuttamat vaikutukset muihin komponentteihin ja suurempiin systeemeihin. Seurauksia tulisi tutkia aina ylemmälle hierarkiatasolle saakka. Vian seurausten vakavuutta arvioidaan huomioiden kaikki seuraukset. Vakavuutta voidaan arvioida esimerkiksi numeroarvoin. Auto- ja elektroniikkateollisuus käyttävät 10-tasoista mittaria, jossa kymmenen on kriittisin. Sotateollisuus käyttää yleensä 4-tasoista mittaria, missä kriittisin on neljä. Liitteessä 2 on taulukko kriittisyysasteikosta. (Yang 2007, s. 200–202)

Vakavuuden arvioinnin jälkeen tiedetään vika ja sen vaikutukset. Tämän jälkeen selvitetään millä vikaantumismekanismeilla näin voi käydä. Tietämällä nämä mekanismit tunnistetaan myös suunnittelun heikkoudet. Vikaantumismekanismeja voi olla esimerkiksi väärä komponentti, väärin käytetty materiaali, väärä asennus, ylikuormitus tai korroosio. (Yang 2007, s. 201–202)

Toinen arvioitava asia on vian toteutuminen. Tätä voidaan pitää vikaantumisen todennäköisyytenä. Kuten vakavuuden arvioinnissakin, niin tässä voidaan käyttää samankaltaisia asteikkoja. Liitteessä 2 on taulukko todennäköisyysasteikosta. (Yang 2007, s. 202–203)

Vikaantumiset tulisi havaita mahdollisimman nopeasti, minkä takia niiden ilmenemiselle on päätettävä jokin seurantatapa. Ehkäisevillä mittauksilla voidaan ennaltaehkäistä vikaantumisia tai ilmoittaa mahdollisista vikaantumisvaaroista. Vikojen havainnoinnissa voidaan myös hyödyntää erilaisia tietokoneanalyysejä, suunnittelukatselmuksia tai testausta. Vian ilmeneminen tulee myös arvioida. Yleensä tälle käytetään käännettyjä asteikkoja, eli auto- ja elektroniikkateollisuudessa käytetyllä asteikolla 1-10, yksi on parhaiten ja kymmenen huonoiten havaittava. Liitteessä 2 esitetään taulukko havaittavuusasteikosta. (Yang 2007, s. 203)



Tämän jälkeen analyysissä lasketaan vioille riskiluvut (Risk Priority Number, RPN). Riskiluku saadaan kertomalla vakavuus (Severity, *S*), toteutuminen (Occurrence, *O*) ja ilmeneminen (Detection, *D*) keskenään:

$$RPN = SOD. \quad (9)$$

Riskiluku kertoo vikaantumistyyppin vakavuudesta ja riskistä. Esimerkki riskilukuasteikosta on liitteessä 2. (Yang 2007, s. 203–204)

Vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysiä (ks. luku 3.4.6) tehdessä lasketaan myös komponenttien kriittisyys. Yleisimmin käytetyt tavat mitata kriittisyyttä ovat kriittisyys (Mode Criticality Index) ja riskitaso (Level of Risk). (IEC/ISO 31010 2009, s. 47)

Korjaavia toimenpiteitä kehitetään, kun viat ja niiden mekanismit ovat tunnistettu. Toimenpiteillä pyritään joko poistamaan tai ainakin vähentämään vioittumisen todennäköisyyttä tai sen vaikutuksia. Tässä vaiheessa on hyvä huomioida myös systeemin luontaiset tavat kompensoida vikoja. (IEC/ISO 31010 2009, s. 48)

Analyysin lopuksi kaikki tehdyt asiat dokumentoidaan. Jotta dokumentti olisi mahdollisimman kattava, täytyy siitä löytyä ainakin lähtötiedot, tehdyt taulukot, korjaavat toimenpide-ehdotukset, päätökset ja jatkotoimenpiteet. Jos analyysissä laskettiin myös komponenttien kriittisyyttä, täytyy sen laskumenetelmä ilmoittaa. (IEC/ISO 31010 2009, s. 48)

### 3.4.4 Edut ja haitat

Tärkein asia mitä vika- ja vaikutusanalyysillä saavutetaan, on vikaantumistapojen ja niiden vaikutusten tunnistaminen. Koska analyysissä tutkitaan kaikkia tarvittavia osia, tulee tätä kautta huomioitua laajasti erilaiset vikaantumismahdollisuudet. Edellisten lisäksi analyysiä tehdessä tulee myös suunniteltua korjaavia toimenpiteitä, joten pahimmat viat saadaan poistettua järjestelmästä. Analyysillä voidaan myös huomata ihmisestä johtuvia virheitä. (IEC/ISO 31010 2009, s. 48)



Tarkasteltaessa erilaisia suunnitteluvaihtoehtoja, tällä analyysillä pystytään hyvin vertailemaan konsepteja riskiluvun mukaan. Analyysi myös korostaa suurilla riskiluvuilla niitä konstruktion osa-alueita, joihin tulee kiinnittää enemmän huomiota suunnittelussa. Nämä kaikki tekevät tulevasta tuotteesta ja sen suunnittelusta halvemman, jos vika- ja vaikutusanalyysiä käytetään suunnittelun alkuvaiheessa. (O'Connor 1995, s. 160)

Analyysin tulosten perusteella voidaan luoda erilaisia rutiineja helpottavia kaavioita ja taulukoita esimerkiksi suunnittelulle tai huollolle. Tuloksena saatavasta taulukosta nähdään helposti sellaiset komponentit, joiden vikaantumista ei havaita helposti. Tällaisille komponenteille on hyvä harkita ennakoivaa huoltoa. Luotujen taulukoiden avulla saadaan siis lähtötietoja ennaltaehkäisevälle kunnossapitostrategialle. (IEC/ISO 31010 2009, s. 48 ja O'Connor 1995, s. 160)

Tutkittaessa vikojen ilmenemistä on usein tarve kehittää erilaisia testejä parantamaan ilmenemistä. Tähän tarkoitukseen ovat erilaiset sisäänrakennetut testit (Built-in-Test, BIT) hyviä. Näillä testeillä huomataan mahdolliset viat jo ennen kuin tuote toimitetaan asiakkaalle. Tällaisia testejä voivat olla esimerkiksi erilaiset painetestit tai koestukset. (O'Connor 1995, s. 160–161)

Tuotannolle tehtävä vika- ja vaikutusanalyysi testaa hyvin tuotannossa piilevät vikaantumismahdollisuudet. Tämä on hyvä tehdä ennen kuin tuotanto aloitetaan. Tällä tavoin voidaan välttyä suurilta korjausinvestoinneilta. (O'Connor 1995, s. 161)

Analyysin ja sen dokumentoinnin jälkeen, sillä voidaan osoittaa asiakkaalle, että tuotteen luotettavuutta on tutkittu kunnolla. Tämä voi parhaimmillaan tuoda myös kilpailuetua. Analyysin tuloksia voidaan myös hyödyntää muissa analyyseissä, kuten vikapuuanalyysissä. (IEC/ISO 31010 2009, s. 47 ja O'Connor 1995, s. 161)

Vika- ja vaikutusanalyysillä tunnistetaan vain yksittäiset viat, ei useamman vian kombinaatioita. Analyysi myös laajenee ja vaikeutuu helposti mitä monimutkaisimmalle systeemille se tehdään. Näistä syistä, ilman riittävää kontrollia ja keskittymistä, analyysin tekemisestä voi tulla kallis ja aikaa vievä tapahtuma. (IEC/ISO 31010 2009, s. 48 ja IEC 60812 2006, s. 33–34)

### 3.4.5 Riskiluku (RPN)

Vika- ja vaikutusanalyysissä vikaantumisia vertaillaan niiden riskiluvun perusteella. On kuitenkin hyvä huomioda, ettei niihin voida aina suoraan luottaa. On myös tärkeä huomioda, että vian vakavuus ja toteutuminen ovat usein tärkeämpiä tekijöitä kuin sen ilmeneminen.

Käytettäessä 10-tasoisia-asteikoita kaikille riskiluvun tekijöille, suurin mahdollinen riskiluku on 1000. Kaikkiaan riskilukuja on vain 120 erilaista eli 88 % asteikosta on tyhjää. Näistä luvuista yli puolet on väliltä 0–200. Väliltä 600–1000 löytyy enää kymmenen eri riskilukua. Tästä syystä suurin osa numeroista tulee jäämään alle 200, eli täytyy huomioda, että nekin ovat jo vaarallisia. Taulukossa 3.2 esitetään riskilukujen jakauma. (IEC 60812 2006, s. 28 ja Yang 2007, s. 208–209)

**Taulukko 3.2** Riskilukujen jakauma kertoimien ollessa 1-10 (Yang 2007, s. 209)

Riskiluku	Lukumäärä	%
1-200	67	55,8
<200-400	26	21,7
<400-600	17	14,2
<600-800	7	5,8
<800-1000	3	2,5

Riskilukujen arvoja tulkitessa täytyy huomata, että tarkoituksena ei yleensä ole poistaa kaikkia mahdollisia vikaantumisia, vaan ainoastaan ne jotka ovat merkittäviä riskejä. Mikä johtaa siihen, että täytyy päättää raja-arvot milloin riski on merkittävä ja se vaatii jatkotoimenpiteitä. Stamatisin mukaan voidaan ajatella, että asteikoilla 1-10 haluttaessa 95 % luotettavuus, merkittävän riskin rajaksi valitaan 50. Tämä perustuu yksinkertaiseen laskutoimitukseen. 95 %:a 1000:sta on 950. Vähennetään 1000:sta 950 joka on 50. Näin saadaan raja-arvo 50 sille, mitkä ovat merkittäviä riskejä. Vaikka riskilukujen jakauma ei olekaan lineaarinen, kuten edellä esitetty laskutoimitus on, saadaan tällä yksinkertaisella laskulla hyviä tuloksia, kunhan vaadittu luotettavuus pysyy tarpeeksi suurena. Täytyy kuitenkin muistaa, ettei valittu arvo ole absoluuttinen totuus, vaan sen tarkoitus on ennemminkin toimia ohjaavana arvona. Riskiluvun arvo riippuu pääasiassa analyysin tekevistä asiantuntijoista. (Stamatis 1995, s. 35–39)

Kuten jo edellä on todettu, niin riskilukuun ei voida aina suoraan luottaa, jos sen kertoimia ei tunneta. Kertoimien ollessa väliltä 1–10, löytyy näiden riskiluvuista ainoastaan kuusi ainutlaatuista kombinaatiota. Muut luvut saadaan ainakin kahdella erilaisella kerroinryhmällä. Hyvä esimerkiksi tästä on luku 252, joka saadaan yhdeksällä eri kombinaatiolla. Taulukossa 3.3 luetellaan luvun 252 mahdolliset kertoimet. (Yang 2007, s. 208–209)

**Taulukko 3.3** Riskiluvun 252:n kertoimet (Yang 2007, s. 209)

Vakavuus	Toteutuminen	Ilmeneminen
4	7	9
4	9	7
6	6	7
6	7	6
7	4	9
7	6	6
7	9	4
9	4	7
9	7	4

Kertoimien arvioiminen voi olla vaikeaa ja joissain tapauksessa niiden arvioiminen ylä- tai alakanttiin saattaa aiheuttaa riskiluvun suuren muutoksen. Tämä tulee erityisesti esille silloin kun kaksi muuta kerrointa ovat suuria. Jos kertoimet ovat yhdeksän, yhdeksän ja kolme, on riskiluku 243, mutta jos kerroin kolme muutetaan neljäksi, niin riskiluku nouseekin 324:ään. Näiden kahden luvun erotus 81 on huomattavan suuri niin pieneen muutokseen. (IEC 60812 2006, s 28)

Edellä olevia arvioitavia kertoimien arvoja päätettäessä voidaan päätyä siihen tilanteeseen, etteivät analysoijat osaa päättää lukuarvoja. Kahden peräkkäisen luvun tilanteessa valitaan aina suurempi. Jos ei kuitenkaan päästä yhteisymmärrykseen ja arvoa mietitään kahden peräkkäisen luvun välillä, valitaan näiden lukujen keskiarvo. Tilanteessa, jossa pohditaan kahden luvun väliltä, mitkä eivät ole peräkkäin, joudutaan tekemään kompromissi, vaikka se jättäisikin jonkin mielipiteen huomioimatta. Suuremman luvun valinta on aina turvallisempaa kuin pienemmän, sillä muuten vika saattaa jäädä huomioimatta. (Stamatis 1995, s.448)



### 3.4.6 FMECA

Kuten vika- ja vaikutusanalyysikin niin vika-, vaikutus- ja kriittisyysanalyysi (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA) löytyy MIL-STD-1629-standardista. Suomeksi tämä analyysi voidaan lyhentää VVKA:ksi, mutta usein sekin tunnetaan sen englanninkielisellä lyhenteenä FMECA. Tämä on samankaltainen analyysi kuin vika- ja vaikutusanalyysikin, mutta tämän lisäksi analyysissä lasketaan komponenttien kriittisyys. Jotta tämä voidaan laskea, tarvitaan komponenteista lisää lähtötietoja kuten sen vikaantumistiheys ja -todennäköisyys. Kriittisyys voidaan laskea muutamalla eri tavalla ja niistä yleisimmin käytettyjä ovat vikaantumistavan kriittisyys (Mode Criticality Index) ja riskitaso (Level of Risk). Osien kriittisyydet saadaan summaamalla kaikki samaan osaan liittyvät eri vikaantumistapojen kriittisyydet keskenään. (O'Connor 1995, s. 157)

Vikaantumistavan kriittisyys lasketaan:

$$C_m = \beta \alpha \lambda_p t, \quad (10)$$

jossa  $\beta$  on todennäköisyys vialliselle toiminnalle,

$\alpha$  on vikaantumissuhde,

$\lambda_p$  on osan vikaantumistiheys ja

$t$  on toiminta- tai riskiaika. (O'Connor 1995, s. 157 ja IEC 60812 2006, s. 23)

Riskitaso  $R$  saadaan kertomalla vian seurauksen arvo  $S$  ja vikaantumisen todennäköisyys  $P$  keskenään:

$$R = SP. \quad (11)$$

Riskitaso voidaan ilmaista laadullisena, puoli-määrällisenä tai määrällisenä. (IEC 60812 2006, s. 21 ja IEC/ISO 31010 2009, s. 48)



### 3.4.7 Esimerkki – Auton sähköikkunat

Vika- ja vaikutusanalyysin esimerkkinä ovat auton sähköikkunat, joka on taulukossa 3.4. Moottorin vikaantuminen ja ikkunan jumiutuminen voivat aiheuttaa sen, että ikkuna ei pääse aukeamaan tai sulkeutumaan. Taulukosta huomaa, että kriittisyys riippuu siitä, missä asennossa ikkuna on ja mitä ikkunalla pyritään tekemään.

**Taulukko 3.4** Esimerkki vika- ja vaikutusanalyysistä: Auton sähköikkunat

Osa	Vikaantumistapa	Vikaantumisvaikutukset	Syy vikaantumistavalle	Seuranta-tavat	Kriittisyys	Todennäköisyys	Havaittavuus	RPN
Moottori	Moottori ei toimi	Ikkuna ei nouse	Moottori hajonnut	-	8	2	2	32
Moottori	Moottori ei toimi	Ikkuna ei laske	Moottori hajonnut	-	6	2	2	24
Ikkuna	Ikkuna on jumissa	Ikkuna ei nouse	Jokin estää ikkunan liikkumisen	-	8	2	1	16
Ikkuna	Ikkuna on jumissa	Ikkuna ei laske	Jokin estää ikkunan liikkumisen	-	6	2	1	12

Riskiluvun mukaan suurimmat riskit johtuvat moottorin hajoamisesta (riskiluvut 32 ja 24). Todellisuudessa huomattavimmat riskit ovat kuitenkin todennäköisesti ne viat, jotka estävät ikkunan sulkemisen (riskiluvut 32 ja 16). Vaikka riski, jonka riskiluku on 16, ei olekaan suurin tai edes toiseksi suurin, voidaan sitä silti pitää huomattavana riskinä. Tämä siksi, että sen riskiluvun kertoimissa ainoastaan havaittavuus on yhden numeron pienempi kuin moottorista johtuvien vikojen, mutta silti kriittisyys on suurin. Niinpä on tärkeää tuntea myös riskilukujen kertoimet itse riskiluvun lisäksi. Riskejä arvioitaessa täytyy ajatella itse tuotteen käyttötarkoitus, eikä voida siis luottaa suoraan riskilukujen suuruuteen vertaillen riskejä. Auton ikkunan tilanteessa on usein kriittisempää saada suljettua ikkuna suljettua kuin avata se.

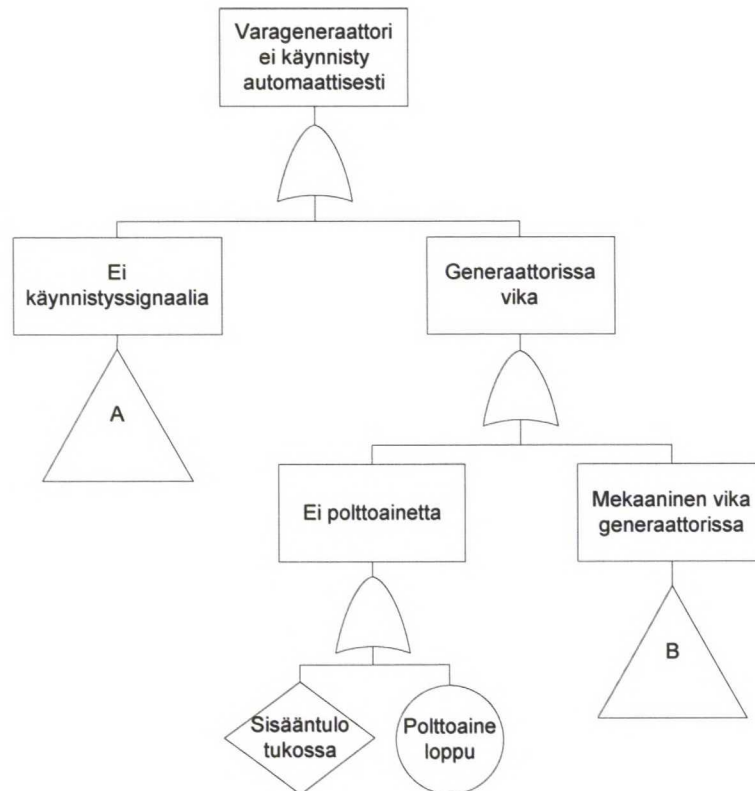
## 3.5 Vikapuuanalyysi (FTA)

Vikaantumisilla saattaa olla monimutkaisia ja pitkiä vikaantumismekanismeja. Näiden kaikkien taustalla on yleensä yksittäinen vikaantuminen, josta pitkät vikaantumisketjut alkavat. Vikapuuanalyysillä selvitetään kaikki mahdolliset tavat, jolla määritetty tapahtuma tapahtuu. Tämä luotettavuusanalyysi tunnetaan myös nimellä Fault Tree Analysis tai lyhenteellä FTA. Vikapuuanalyysistä löytyy myös standardi IEC 61025 Fault Tree Analysis (FTA).

### 3.5.1 Tausta

Vikapuuanalyysi on tekniikka, jolla tunnistetaan ja analysoidaan tekijöitä, jotka voivat johtaa tiettyyn tapahtumaan. Tätä ennalta määriteltyä tapahtumaa kutsutaan huipputapahtumaksi (Top Event). Vikapuuanalyysiä käytetään usein vika- ja vaikutusanalyysin yhteydessä. (Koivula 2006, s. 64)

Huipputapahtumaan johtavat yksittäiset tai yhdistetyt tekijät ryhmitellään loogisesti ja ne esitetään puukuvaajassa. Kuvaajasta selviää erillisten tekijöiden väliset loogiset yhteydet aina huipputapahtumaan saakka. Analyysi etenee huipputapahtumasta alaspäin eli ylhäältä alaspäin (Top-Down). Puukuvaajassa käytetään standardoituja symboleja helpottamaan kuvaajan lukemista. Esimerkki puukuvaajasta on kuvassa 3.8. (O'Connor 1995, s. 163 ja Koivula 2006, s. 64)



**Kuva 3.8** Vikapuuanalyysin puukuvaaja (muokattu) (IEC/ISO 31010 2009 s. 49)

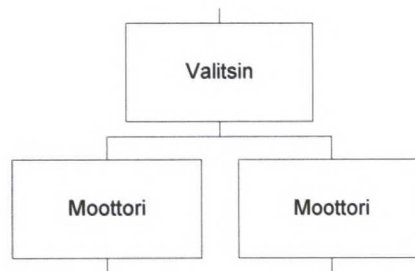
Tuotteen suunnitteluvaiheessa vikapuuanalyysiä voidaan käyttää apuna vertailemaan eri suunnitteluvaihtoehtoja. Kun tuote on jo käytössä, tällä luotettavuustyökalulla voidaan tutkia miten suuret toimintahäiriöt syntyvät. Vikapuuanalyysiä voidaan myös hyödyntää jo syntyneen vian tarkempaan tutkimukseen, jotta nähdään mistä se on alun perin lähtenyt liikkeelle. Analyysiä voidaan käyttää yksinkertaisesti laadullisena, mutta sitä voidaan myös käyttää määrällisenä, jolloin lasketaan tapahtumien todennäköisyyksiä. (IEC/ISO 31010 2009 s. 49)

Monimutkaisissa tapauksissa voi olla tarpeen tehdä erilliset vikapuuanalyysit. Erityisesti tapauksissa, joissa huipputapahtuma voi johtua täysin erilaisista vikaantumista tai erilaisista loogisista tapahtumasarjoista. Vikapuuta voidaan myös jakaa useampaan puuhun, mikäli se helpottaa rakenteen lukemista ja ymmärtämistä. (O'Connor 1995 s. 163)

Yksinkertaisten vikapuiden teossa voidaan hyödyntää Microsoftin Visio-ohjelmaa. Tällä pystytään luomaan helppo puukuvaaja nopeasti. Laajemmissa ja monimutkaisemmissa tapauksissa on hyvä käyttää puukuvaajan tekoon Ramentorin ELMAS-ohjelmaa. Ohjelmalla pystyy tekemään suhteellisen helposti monimutkaisia

kuvaajia. Hyvänä etuna ELMAS-ohjelmassa on se, että se pystyy laskemaan tarvittaessa vikapuun todennäköisyyksiä. (Kangas 2005)

Vikapuuanalyysissä voidaan törmätä tilanteeseen, jossa yksi ainoa tapahtuma tai vika aiheuttaa muidenkin tapahtumien vikaantumisen. Tällaista vikaa kutsutaan yhteisviaksi (Common Cause Failure, CCF). Kuva 3.9 esittää yhteisvian symbolisesti. Kuvassa valitsimen hajoaminen johtaa siihen, ettei kumpikaan moottori kytkeydy päälle. Vikaantumistapaa, joka johtaa tällaiseen tapahtumaan, kutsutaan yhteisvioittumistavaksi (Common Mode Failure, CMF). Näiden tunnistaminen ja arvioiminen on tärkeää, sillä niillä voi olla suurempi todennäköisyys kuin siitä riippuvilla tapauksilla. Tällaiset tapaukset pitäisi saada poistettua systeemistä, tai niiden vaikutuksia pitäisi pyrkiä pienentämään mahdollisimman paljon. (O'Connor 1995 s. 163–167 ja Harju 2003 s. 77–78)



**Kuva 3.9** Yhteisvika (muokattu) (Quality tools)

Tyypillisiä yhteisvikaantumiskohtia ovat:

- Siirtyminen aktiivisesta Stand-by-systeemiin epäonnistuu.
- Sensori, joka havaitsee tai ilmaisee vikaantumisen, vikaantuu.
- Tehon tuonti estyy.
- Huoltotapahtuma jossa huoltaja unohtaa tehdä tarvittavat toimenpiteet kaikkiin komponentteihin, kuten unohtaa vaihtaa lentokoneen kaikkien moottorien tiivisteet.
- Ohjelma, joka on sama monelle eri polulle, vikaantuu. (O'Connor 1995 s. 166)

Yhteisvikaantumisten lisäksi vikapuuanalyysillä voidaan löytää sellaisia tapauksia (Enabling events), jotka tekevät muista vikaantumistapahtumista huomattavasti



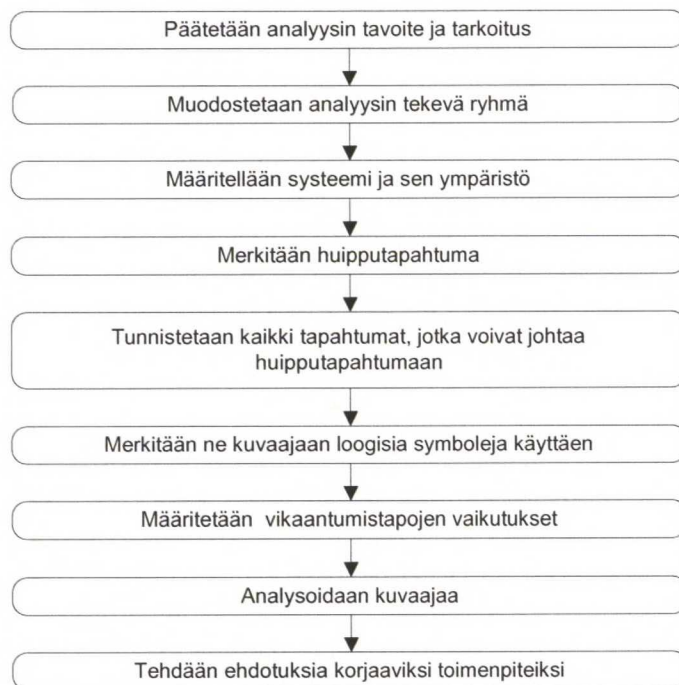
normaalia vaarallisemman. Tällaiset tapaukset pitäisi pyrkiä tekemään mahdottomaksi. Näitä tapahtumia ovat:

- Varoitussysteemin sulkeminen kunnossapidon takia
- Ohjaus on asetettu väärin.
- Käyttö- tai kunnossapitohenkilöstö seuraa ohjeita väärin, tai ei seuraa niitä ollenkaan. (O'Connor 1995 s. 167)

### 3.5.2 Prosessi

Analyysin aluksi sille määritetään syy. Tämä on tärkeää siksi, että keskitytään oleellisiin asioihin. Jotta analyysistä tulisi mahdollisimman todenmukainen ja hyödyllinen, valitaan sitä tekemään joukko asiantuntijoita, jotka tuntevat tai ainakin tietävät jo entuudestaan systeemin.

Ennen ongelman tarkempaa analysoimista määritetään systeemi ja sen ympäristö, johon ongelma liittyy. Systeemin hierarkia pitää käydä ryhmässä läpi, jotta analyysi pystytään tekemään helpommin ja varmemmin. Hyvänä lähtötietona tässä vaiheessa on olla jonkinlainen toiminnallinen lohkokaavio. Kuvassa 3.10 on vikapuuanalyysin prosessi. (Yang 2007, s. 213)



**Kuva 3.10** Vikapuuanalyysin prosessi

Puukuvaajalle päätetään huipputapahtuma, kun systeemi on käyty läpi. Se voi olla toimintahäiriö tai laajempi tulos häiriöstä. Analysoitava huipputapahtuma voi olla myös jokin lievempi toimintahäiriö. Jos analyysi tehdään vika- ja vaikutusanalyysin yhteydessä, valitaan huipputapahtumiksi ne vikaantumiset, joiden seurausten vakavuudet ovat suurimpia. (IEC/ISO 31010 2009, s. 50 ja Yang 2007, s. 213)

Seuraavaksi tunnistetaan järjestelmällisesti kaikki ne syyt ja toimintahäiriöt, jotka johtavat huipputapahtumaan. Jokainen näistä häiriöistä analysoidaan, jotta saadaan selville niiden syyt. Näitä tapahtumia ja niihin liittyviä yhteyksiä kuvataan standardisoiduilla symboleilla. Tätä hierarkkista tunnistusta jatketaan niin pitkälle, kuin se on tarpeen. Pohjimmaista tapahtumaa kutsutaan perusvikatapahtumaksi tai perustapahtumaksi. (IEC/ISO 31010 2009, s. 50 ja Virtanen 2004, s. 21)

Vikapuuanalyysistä saadaan määrällinen luotettavuustyökalu, jos tunnetaan sen perusvikatapahtumien todennäköisyydet. Tätä kautta voidaan laskea huipputapahtuman todennäköisyys. Jos todennäköisyyksiä lasketaan, täytyy pystyä varmistamaan se, että puun loogisuus vastaa mahdollisimman paljon todellisuutta. Monimutkaisissa systeemeissä yksinkertaistamalla puuta voidaan saada myös suuntaa-antavia tuloksia. (IEC/ISO 31010 2009, s. 49–50)

Tuloksena vikapuuanalyysistä saadaan kuvaaja siitä, millaisia eri reittejä pitkin huipputapahtuma voi tapahtua. Tuloksena voi myös olla huipputapahtuman todennäköisyys, jos käytössä on perustapahtumien todennäköisyydet.

Vikapuuanalyysin lopussa tehdään tarvittaessa ehdotuksia korjaaviksi toimenpiteiksi. Näillä toimenpiteillä pyritään poistamaan tai pienentämään vikaantumisten todennäköisyyksiä ja vaikutuksia, erityisesti pyritään poistamaan yhteisvikaantumiskohtia. Koko analyysi tulee lopuksi dokumentoida. Tärkeimpänä ovat itse puukuvaaja ja korjaavat toimenpide-ehdotukset. Lisäksi dokumentaatiosta tulee löytyä analyysin taustatiedot, päätökset ja jatkotoimenpiteet, kuten korjaavien toimenpiteiden seuranta. (IEC 61025 2006, s. 17)

### 3.5.3 Edut ja haitat

Vikapuuanalyysi on kurinalainen, systemaattinen ja yksinkertainen luotettavuustyökalu. Vaikka se onkin tarkoin määritetty, on se samalla tarpeeksi joustava, jotta voidaan analysoida monia eri tekijöitä, kuten ihmisen aiheuttamia tapahtumia ja muita fyysisiä ilmiöitä. Looginen analysointitapa tunnistaa helposti erilaiset yksittäiset reitit monimutkaisessa systeemissä, jotka saattavat helposti jäädä huomaamatta. Vikapuuanalyysillä saadaan tulokseksi vikaantumispolut, niihin johtavat perusviat ja nähdään systeemin heikot alueet, jotka tarvitsevat lisätutkimusta. (IEC/ISO 31010 2009, s. 50, O'Connor 1995, s. 163 ja Yang 2007, s. 212)

Ylhäältä alaspäin (Top-Down) etenevä analyysi rajaa keskittymisen vain niihin tapahtumiin, jotka liittyvät huipputapahtumaan. Tästä huolimatta vikapuuanalyysi sopii hyvin myös sellaisille systeemeille, joilla on monia eri käyttäjärajajoja. (IEC/ISO 31010 2009, s. 50)

Vikapuun rakenne kuvastaa hyvin systeemin toiminnallisuutta. Tämän takia voidaan tarkastella sen rakennetta ja tehdä korjausehdotuksia systeemin heikoille alueille. Tuloksena saatua kuvaajaa voidaan hyödyntää suunnittelun lisäksi myös kunnossapidon suunnittelussa ja vikojen analysoinnissa. (Yang 2007, s. 212)

Vikapuuanalyysin tuloksena saatava kuvaaja on selkeästi luettavissa ja ymmärrettävissä. Sen avulla nähdään myös osa laitteen toiminnasta. Tietokoneohjelmilla pystytään luomaan suurempia ja monimutkaisempia puukuvaajia. Monimutkaisten kuvaajien lisäksi tietokoneella pystytään laskemaan automaattisesti myös huipputapahtuman todennäköisyys, jos tarvittavat lähtötiedot ovat saatavilla.

Yksi suurimmista ongelmista vikapuuanalyysissä on se, että siinä käsitellään vain sellaisia vikoja, jotka joko tapahtuvat (Failed) tai eivät tapahdu (Not Failed). Tämä saattaa johtaa siihen, että kaikkia vikaantumisreittejä ei löydetä. Tärkeiden vikojen huomiotta jättämistä voi olla vaikea todeta. Myös vikaantumisista aiheutuvia muita vikoja pahentavia tapahtumia voi olla vaikea korostaa. (IEC/ISO 31010 2009, s. 51)


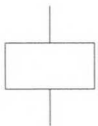



Suuren ja monimutkaisen puukuvaajan tekemiseen tarvitaan lähes aina tietokoneohjelman apua, erityisesti silloin kun on tarkoitus laskea huipputapahtuman todennäköisyyttä. Määrällisenä tehdyssä analyysissä pitää huomioida se, että kaikki perusvikatapahtumissa olevat epävarmuudet saattavat kertaantua huipputapahtumalle, jolloin lopullinen tulos ei olekaan täysin todenmukainen.

### 3.5.4 Symbolit



Vikapuuanalyysissä käytettävät symbolit ilmoittavat millainen tapahtuma on kyseessä, tai millainen on tapahtumien yhteys keskenään. Symbolit voivat olla normaaleja, itsenäisiä tai merkityksettömiä. Symbolit jaetaan kahteen eri tyyppiin: tapahtuma- ja logiikkasymboleihin eli portteihin. Tapahtumat ovat nimensä mukaisesti tapahtumia. Portit taas kuvaavat tapahtumien välistä logiikkaa. Yleisimpiä porttisymboleja ovat ja- ja tai-symbolit. Erilaisia symboleja esitellään taulukoissa 3.5 ja 3.6. (Yang 2007, s. 213–215)

**Taulukko 3.5** Yleisimmät tapahtumasymbolit (Yang 2007, s. 214 ja IEC 61025 2006, s. 41)

Symboli	Symbolin nimi	Määritelmä	Kuvaus
	Perustapahtuma	Alimman tason vikaantuminen	Komponentin vikaantumistapa, tai yksittäisen vian syy
	Yhdistelmä-tapahtuma	Tapahtuma, joka johtuu alemman tason tapahtumista	Huipputapahtuman ja perustapahtumien välissä oleva tapahtuma
	Siirtymä	Vikapuu jatkuu toisessa vikapuussa	Vikapuu voidaan tehdä pienemmissä kokonaisuuksissa

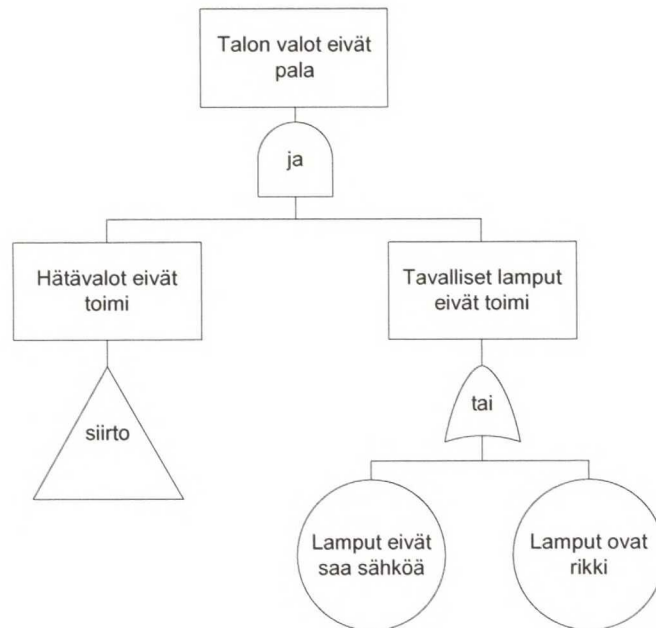


**Taulukko 3.6** Yleisimmät logiikkasymbolit (Yang 2007, s. 215 ja IEC 61025 2006, s. 42)

Symboli	Symbolin nimi	Määritelmä
	Ja-portti	Kaikkien tapahtumien täytyy tapahtua
	Tai-portti	Jonkun tapahtuman täytyy tapahtua

### 3.5.5 Esimerkki – Talon valot eivät toimi

Esimerkissä huipputapahtumaksi valittiin: Talon valot eivät pala. Kuvassa 3.11 on esimerkin puukuvaaja. Kuvaajaan muodostui kaksi päähaaraa, joiden on molempien toteuduttava, jotta huipputapahtuma voi toteutua. Hätävalojen toimimattomuutta tutkitaan toisessa kuvaajassa, koska kuvaajassa on käytetty siirto-symbolia. Toisessa haarassa oleva tavallisten lamppujen toimimattomuus johtuu jommastakummasta perustapahtumasta: lamput eivät saa sähköä tai lamput ovat rikki. Jos tunnetaan näiden perustapahtumien ja siirto haaran todennäköisyydet, voidaan laskea myös huipputapahtuman todennäköisyys.



**Kuva 3.11** Esimerkki vikapuuanalyysistä: talon valot eivät pala (muokattu)  
(Kececioğlu 1991, s. 210)

## 3.6 Delfoi-metodi

Delfoi-metodi on vanha tapa kerätä postin avulla ratkaisuja johonkin tiettyyn ongelmaan. Moniin ongelmiin ja luotettavuusanalyysihin saadaan parhaat tulokset käyttämällä asiantuntijaryhmiä. Nykyään tämä saattaa kuitenkin olla ongelmallista, sillä teollisuus levittää asiantuntijoita ympäri maailmaa. Tällä metodilla saadaan yhdistettyä asiantuntijoiden mielipiteitä, vaikka he eivät olisikaan fyysisesti läsnä.

### 3.6.1 Tausta

Delfoi-metodi on työkalu, jota voidaan käyttää tulevaisuuden ennustamiseen. Analyysi toteutetaan käyttämällä valittua asiantuntijaryhmää. Vaikka menetelmää ei aluksi luotukaan luotettavuustyökaluksi, voidaan sitä käyttää sellaisenakin, milloin tahansa tuotteen elinkaaren aikana. Delfoi-metodilla saadaan tulokseksi asiantuntijoiden mielipiteitä liittyen ongelmaan, joka määritellään analyysin alkuvaiheissa. (IEC/ISO 31010 2009, s. 29 ja Oberschmid 2007, s. 5.13)

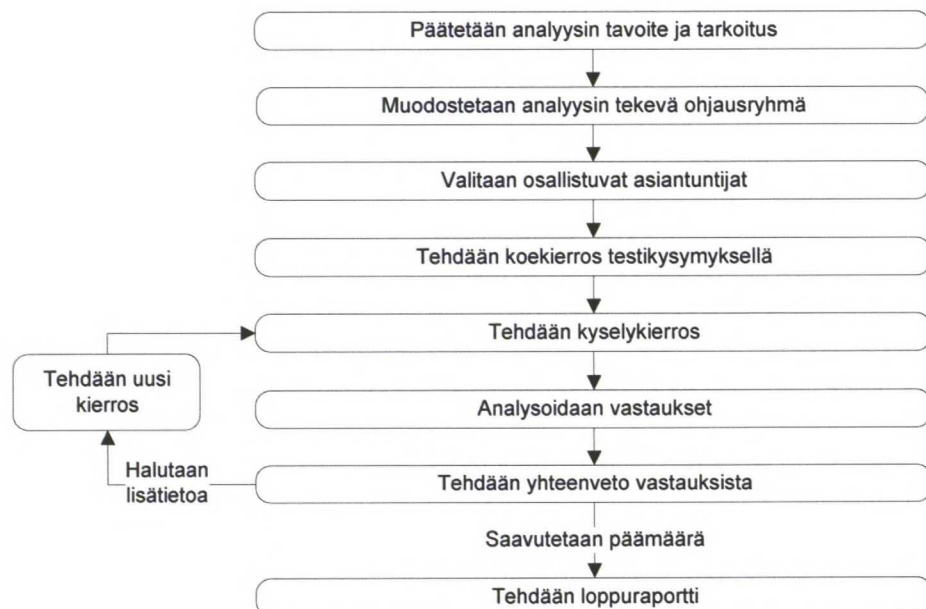
Delfoi-metodissa useat asiantuntijat vastaavat anonyymisti ja itsenäisesti ohjausryhmän luomiin kysymyksiin. Nämä vastaukset lähetetään takaisin ohjausryhmälle, joka analysoi ne ja lähettää asiantuntijoille uudet vastausten mukaan

muunnellut kysymykset sekä yhteenvedon edellisistä vastauksista. Tätä jatketaan iteratiivisesti, kunnes saavutetaan halutut tulokset.

Normaalisti käytettäessä Delfoi-metodia, on siinä mukana erilaisia ryhmiä: päättäjät, työntekijät ja vastaajat eli asiantuntijat. Päättäjät kokoavat ryhmän, jossa on muutama työntekijä ja asiantuntijoita. Päättäjät toimivat koko analyysin ohjaajina, tukevat työntekijöitä ja tekevät lopulliset ratkaisut. Heillä tulee myös olla jo aikaisempaa kokemusta Delfoi-metodista sekä tietoa ratkaistavasta ongelmasta. Työntekijät hoitavat analyysin etenemistä, he valmistelevat kysymykset, lähettävät ne eteenpäin ja kokoavat ja analysoivat vastaukset. Päättäjät yhdessä työntekijöiden kanssa muodostavat ohjausryhmän. Vastaajat ovat ryhmä asiantuntijoita, jotka kysymysten ja palautteen perusteella antavat oman mielipiteensä anonyymisti takaisin työntekijöille. (Oberschmid 2007, s. 5.14)

### 3.6.2 Prosessi

Analyysin aluksi kootaan ohjausryhmä eli päättäjät ja työntekijät, jotka valmistelevat kysymykset, analysoivat vastaukset ja tekevät yhteenvedot. Tämä ryhmä päättää myös siitä, ketkä asiantuntijat valitaan vastaajiksi. Nämä asiantuntijat valitaan analyysin ongelman ja sen tarkoituksen mukaan. Delfoi-metodin tulos riippuu paljon asiantuntijoiden valinnasta. Kuva Delfoi-metodin prosessista on kuvassa 3.12. (IEC/ISO 31010 2009, s. 29–30 ja Oberschmid 2007, s. 5.14–5.15)



**Kuva 3.12** Delfoi-metodin prosessi (Oberschmid 2007, s. 5.17)

Ryhmien valinnan jälkeen, valmistellaan ensimmäinen kysymyskierros. Kysymykset tehdään ohjausryhmässä, joka muotoilee niiden sanamuodot ja rakenteen niin, ettei niitä voida ymmärtää väärin. Nämä kysymykset voivat olla laajoja, sillä näin saadaan kartoitettua asiantuntijoiden mielipiteet heti alusta alkaen, eikä niitä rajata tietyin kysymyksiin. Ensimmäisen kierroksen kysymyksiä voidaan kokeilla testiryhmällä ennen niiden lähettämistä asiantuntijoille. Kun kysymykset ovat valmiita, ne lähetetään valituille asiantuntijoille. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30 ja Oberschmid 2007, s. 5.15)

Asiantuntijoiden vastattua kysymyksiin, ohjausryhmä analysoi ne ja tekee niistä yhteenvedon. Yhteenvedossa ja vastausten käsittelyssä ei saa näkyä kenenkään henkilöllisyyttä, vaan kaikki tapahtuu anonyymisti. Näiden vastausten pohjalta tehdään tarvittaessa uudet kysymykset ja lähetetään ne taas asiantuntijoille. Toisella tai myöhemmillä kysymyskierroksilla lähetetään kysymysten mukana myös yhteenveto edellisierroksen vastauksista. Tätä kysymysten lähettämistä jatketaan niin pitkään kuin on tarpeen. Iteroinnin lopettamisesta päättävät päättäjät. Tuloksena saadaan asiantuntijoiden yhteinen mielipide. Dokumentoinnissa pitää huomioida jokaisen kierroksen kysymykset ja yhteenvedot. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30 ja Oberschmid 2007, s. 5.15–17)

### **3.6.3 Edut ja haitat**

Anonyymiyden takia asiantuntijat uskaltavat ehdottaa myös sellaisia ideoita, joita eivät muuten toisi julki. Anonyymiydestä on myös se hyöty, etteivät muuten dominoivat henkilöt peitä alleen muiden ideoita, vaan kaikki ovat samanveroisia ajatuksia analysoitaessa. Toinen analyysin tärkeimmistä ominaisuuksista on se, ettei kaikkien tarvitse olla samassa fyysisessä tilassa. Tämä luotettavuustyökalu antaa siis ajallisesti sen vapauden, että vastaukset voidaan tehdä silloin kun asiantuntijat ehtivät. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30)

Delfoi-metodin toteuttaminen voi viedä paljon aikaa, koska se toimii lähettämällä kysymyksiä ja odottamalla vastauksia. Tämä korostuu erityisesti silloin, kun joudutaan tekemään monta kysymyskierrosta. Myös vastausten laatu ja siten koko analyysin tulos riippuu siitä, pystyvätkö vastaajat ilmaisemaan itseään kirjoittaen tarpeeksi selvästi, kattavasti ja silti yksinkertaisesti. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30)



## 3.7 Tarkistuslista (Check-lists)

Tarkistuslista on yksinkertaisuudessaan lista huomioitavia asioita. Tätä listaa voidaan käyttää luotettavuustyökaluna, jos tunnetaan jo ennestään erilaisia asioita jotka täytyy huomioida systeemin luotettavuudessa. Tämä vaatii taustalleen jonkin suoritettun luotettavuusanalyysin. Listaa voidaan käyttää esimerkiksi suunnittelussa, ilmavälien muistamisessa tai tuotannossa eri työvaiheissa kuten ruuvien kiristysmomentin varmistamiseksi. Listalla on siis asioita, jotka tiedetään jo entuudestaan vaikuttavan systeemin luotettavuuteen ja tällä tavalla muistuttamalla niistä voidaan välttää niiden aiheuttamat riskit. Jos systeemille on jo tehty vika- ja vaikutusanalyysi, sen vikojen seuranta voidaan kirjata seurattavaksi tällaisilla tarkistuslistoilla. (Birolini 2007, s. 383–386 ja IEC/ISO 31010 2009, s. 30)

### 3.7.1 Prosessi

Tarkistuslistan teon alussa täytyy päättää kenen käyttöön se tulee. Jotta tarkistuslista voidaan tehdä, on sen laatijoilla oltava hyvä tietämys systeemistä tai sen edeltäjästä. Lisäksi on hyvä olla tehtynä jonkinlainen luotettavuusanalyysi, josta saadaan lähtötietoja. Tarkistuslistasta saadaan mahdollisimman kattava silloin, kun sitä laatimassa käytetään suurempaa ryhmää. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30)

Ryhmä laatii listaan systeemille tyypillisiä ongelmia. Näiden lisäksi listaan merkitään myös sellaisia luotettavuusriskejä, jotka ovat mahdollisia. Kun lista on laadittu, ryhmä käy sen järjestelmällisesti läpi ja tarkistaa, että kaikki tarvittavat asiat ovat huomioitu. Tuloksena saadaan kattava lista niistä mahdollisista tapauksista, jotka saattavat vaikuttaa systeemin luotettavuuteen. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30)

### 3.7.2 Edut ja haitat

Tarkistuslistan etuna on, että sitä voivat käyttää kaikki eivätkä vain asiantuntijat. Koska listaa luodessa on käytetty asiantuntijoita, saadaan myös listan käyttäjät huomaamaan sellaisia virheitä, joita he eivät muuten huomaisi. Lisäksi, koska listalla on lueteltu kaikenlaisia ongelmia, eivät yleisimmäkään ongelmat tai huolimattomuusvirheet jää huomioimatta. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30)

Koska listassa lukee vain asiantuntijoiden kirjaamat ongelmat, voidaan päätyä siihen tilanteeseen, ettei uusia mahdollisia luotettavuusriskejä löydetäkään. Tähän saattaa johtaa myös se, että tämä metodi edistää rasti ruutuun -tyyppistä ajattelua, eikä luovaa ongelmien tunnistamista. (IEC/ISO 31010 2009, s. 30)

### 3.8 Tietokoneavusteiset luotettavuustyökalut

Tyypillisesti tuotekehityksessä toistuu eräänlainen iteratiivinen ympyrä, jossa ensin suunnitellaan ja rakennetaan prototyyppi, sitten testataan ja lopuksi korjataan testeissä huomattuja ongelmia. Vaikka tällä tavalla saadaankin hyviä ja luotettavia tuotteita, ei se ole kaikkein tehokkain tapa. On tärkeä pyrkiä löytämään mahdolliset ongelmat jo ennen kuin ensimmäistäkään fyysistä prototyyppiä on valmistettu. Tähän tilanteeseen päästään hyödyntämällä tietokoneella tehtäviä simulaatioita ja analyyskejä. Tyypilliset tietokoneella tehtävät analyysit ovat lujuus-, toleranssi-, lämpö- ja värinäanalyysit. Niiden avulla päästään eroon kalliista ja mahdollisesti hitaasta prototyypin valmistuksesta ja saadaan tulokset nopeasti ilman suurempia kustannuksia. Nykyään analyysit voidaan tehdä usein valmiiden tietokonemallien pohjalta. Tällöin hyödynnetään eräänlaisia virtuaaliprototyyppejä. (Yang 2007, s. 230)

Tietokoneella tällaiset analyysit ratkaistaan käyttäen elementtimenetelmää (Finite Element Method, FEM). Tietokone arvioi pienten elementtien avulla haluttuja ominaisuuksia. Näin päästään yksinkertaisempiin laskuihin. On olemassa useita eri tietokoneohjelmia, jotka on tarkoitettu laskemaan erilaisia analyyskejä elementtimenetelmää hyödyntäen. Saadut tulokset eivät välttämättä ole aivan tarkkoja, sillä usein joudutaan yksinkertaistamaan analysoitavaa systeemiä, jotta laskeminen tapahtuisi kohtuullisessa ajassa.

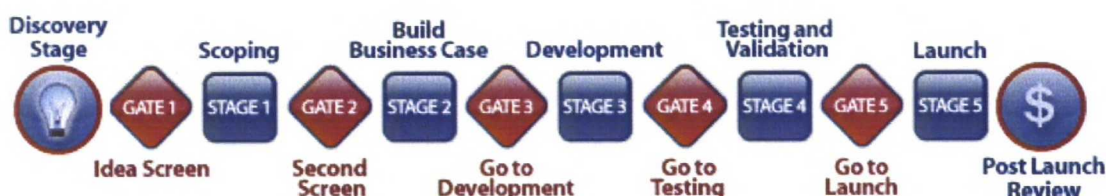
## 4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käsitellään aluksi tutkimukseen liittyvä tuotekehitysmalli ja taajuusmuuttajien toiminta sekä niiden rakenne. Luvun lopussa esitetään tutkimuskohteena olevat tuotteet ja kerrotaan, miten näitä tutkitaan valituilla luotettavuustyökaluilla.

### 4.1 Tuotekehitysmalli

Yrityksillä on käytössään monenlaisia tuotekehitysprosesseja. Yksi käytetyimmistä ja tunnetuimmista tuotekehitysmalleista on Stage-Gate®. Suomeksi prosessia kutsutaan Vaihe-Portti-malliksi, mutta yleisesti siitä käytetään sen englanninkielistä nimeä. Tämä malli jakaantuu nimensä mukaisesti kahdenlaisiin tapahtumiin: työvaiheisiin (Stage) ja portteihin (Gate). Stage-Gate®-tuotekehitysmalli alkaa ideasta ja vie koko prosessin läpi aina valmiin tuotteen julkaisuun. Tällä tuotekehitysmallilla pyritään joustavaan tuotekehitykseen ja sen tarkkaan seurantaan, minkä aikana on myös mahdollista lopettaa projekti Gate-kokouksessa. Yleensä yritykset, jotka käyttävät tätä tuotekehitysmallia, muokkaavat perinteisen Stage-Gate®-mallin omien tarpeidensa mukaisiksi. (Stage-Gate.com ja Haverila 2005, s. 272)

Työvaiheissa tehdään ennalta määrättyjä tehtäviä, jotka pitää saada tehtyä ennen sovittua Gate-kokousta. Näissä tapaamisissa johtoryhmä tarkastelee Stage-vaiheessa tehtyjä asioita ja päättää näiden pohjalta, jatketaanko projektia. Jatkopäätökseen vaikuttaa myös projektin kokonaiskuva, ei pelkästään edellisvaiheesta saadut tiedot. Gate-kokousten tuloksena on päätös siitä, jatketaanko projektia vai ei. Kuvassa 4.1 on Stage-Gate®-tuotekehitysmalli.

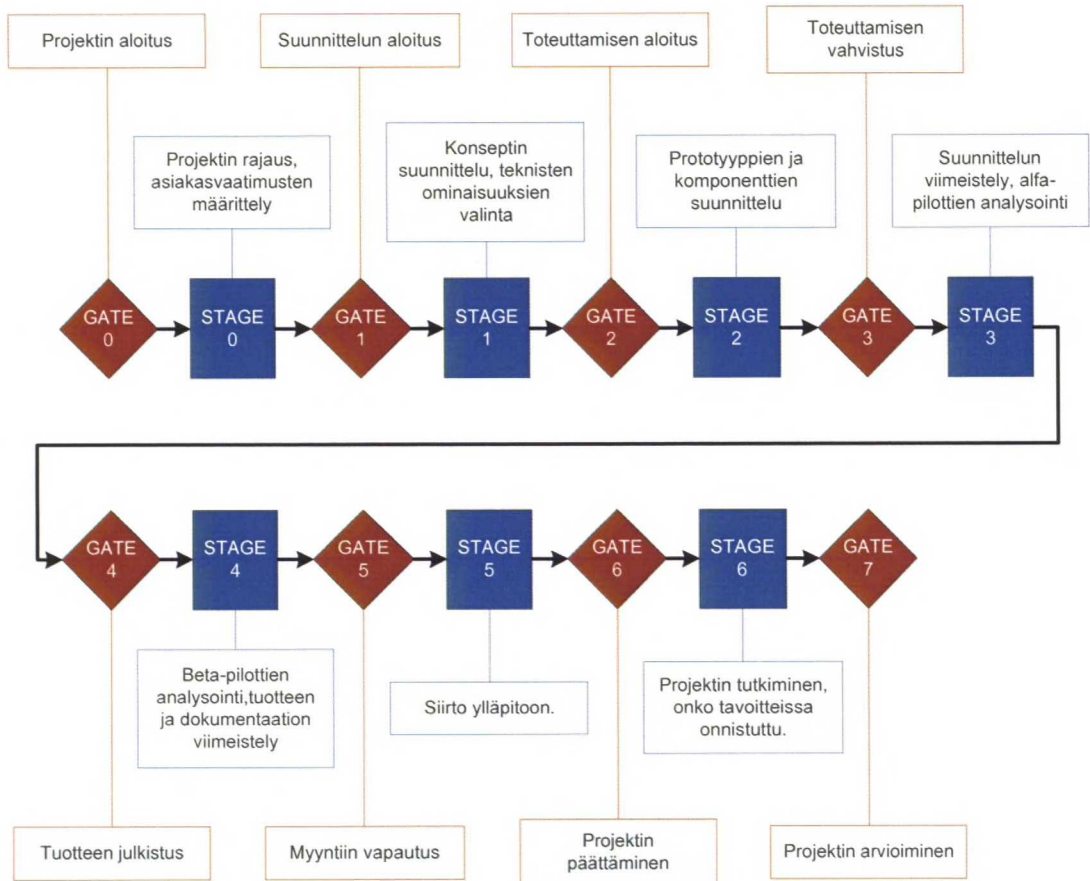


Kuva 4.1 Stage-Gate®-tuotekehitysmalli (Prod-dev.com)

ABB Drives:illa on käytössä myös oma versionsa Stage-Gate®-tuotekehitysmallista. Alkuperäisestä prosessista eroten käytössä on viiden portin sijaan seitsemän porttia.



Tuotekehitysprosessin taustalla ovat samat lähtökohdat kuin alkuperäisessäkin, mutta se on muutettu vastaamaan paremmin ABB:n tarpeita. Kuvassa 4.2 on ABB Drives'in tuotekehitysmalli.



**Kuva 4.2** ABB Drives'in tuotekehitysmallista (Yli-Juuti 2010)

Gate 0 on ensimmäinen päätöspori, jossa päätetään aloitetaanko projekti vai ei. Tämän mallin porteista 0–5 ovat selkeitä päätösporteja. Tällä välin tapahtuu myös itse tuotteen tuotekehitys. Kuudennessa portissa lopetetaan projekti, minkä jälkeen seitsemännessä portissa tutkitaan projektin tuloksia. (Yli-Juuti 2010)

## 4.2 Taajuusmuuttaja

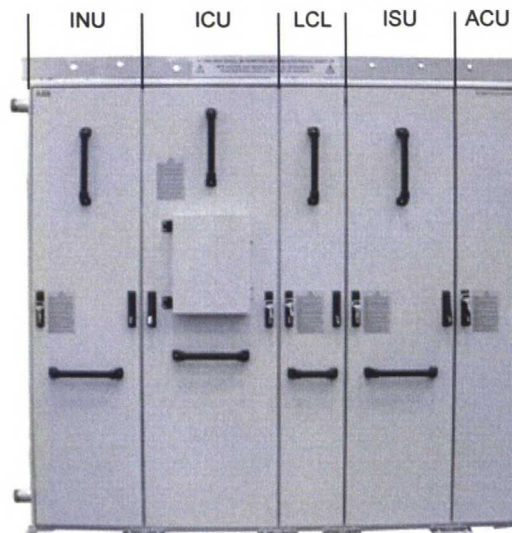
Taajuusmuuttajia (frequency converter) eli vaihtosähkökäyttöjä on totuttu käyttämään teollisuudessa säätämään portaattomasti vaihtosähkömoottoreiden momenttia ja pyörimisnopeutta. Minkä takia taajuusmuuttajat korvaavat systeemeistä vaihteistot ja tekevät toiminnoista monin tavoin tehokkaampia. Teollisuudessa ne ohjaavat monia erilaisia prosesseja kuten paperinvalmistamista, pumppausta ja ilmastointia.



### 4.2.1 Taajuusmuuttaja tuulivoimassa

Tuulivoimassa taajuusmuuttaja toimii päinvastoin kun normaalissa teollisuuskäytössä. Tuulivoimalan yhteydessä taajuusmuuttaja yhdessä generaattorin kanssa tuottaa sähköä ja muuttaa sen sähköverkkoon sopivaan muotoon. Generaattorin tuottama jännite ja sen taajuus vaihtelee tuulen voimakkuuden mukaan, mistä johtuen se ei sellaisenaan kelpaa syötettäväksi sähköverkkoon. Taajuusmuuttajan tehtävä on suodattaa pois jännitteen ja taajuuden epähalutut vaihtelut. Tämän lisäksi taajuusmuuttajalla voidaan helpottaa hetkellisiä syöttökatkoksia. (Kallio 2008)

Tuulivoimassa käytettävä taajuusmuuttaja koostuu viidestä eri perusosasta: vaihtosuuntaajasta (Inverter Unit, INU), välipiiristä, tasasuuntaajasta (IGBT Supply Unit, ISU), ohjausyksiköstä (Auxiliary Control Unit, ACU) ja liitäntäyksiköstä (Incoming Unit, ICU). Vaihtosuuntaaja muuttaa generaattorilta tulevan virran tasavirraksi, josta tasasuuntaajat muuttavat sen vaihtovirraksi, joka on sopivaa syötettäväksi sähköverkkoon. Tasasuuntaajan yhteydessä on myös verkkosuodatin (LCL-suodatin), joka muuttaa virran käyrämuodon lähelle siniaaltoa. Kuvassa 4.3 esitellään eräs ABB:n tuulivoimaan tarkoitettu taajuusmuuttaja. (ABB 2009 ja Kallio 2008)

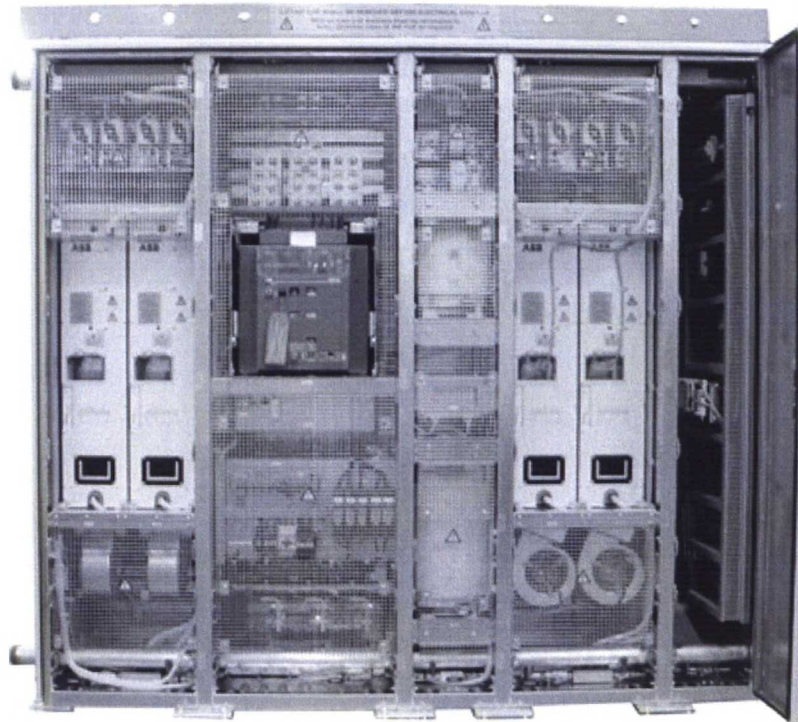


**Kuva 4.3** Taajuusmuuttaja ACS800-77LC, kentät merkittyinä (muokattu) (ABB 2007, s. 26)

## 4.2.2 Kaapitetun taajuusmuuttajan rakenne

ABB:llä suunniteltavat tuulivoimataajuusmuuttajat ovat kaikki suuria kaappeja, jotka pitävät sisällään molempia suuntaaja-moduuleita tehotarpeen mukaan. Kaappi koostuu useasta eri kentästä, joissa suuntaajat ja muut komponentit sijaitsevat. Taajuusmuuttajat ovat suljettuja, jottei ympäristö vaikuttaisi sen toimintaan. Yleisesti nämä kaappirakenteet ovat kaikki luokiteltu IP54:ksi standardin IEC 60529 mukaan. (IEC 60529 2001)

Taajuusmuuttajan mekaaninen rakenne koostuu pääosin ohutlevyosista, kuparikiskosta ja sähkökomponenteista. Laite tuottaa toimiessaan paljon lämpöä, minkä takia niissä on usein nestejäähdytys. Tästä johtuen taajuusmuuttajassa on myös muovi- ja alumiiniputkia. Kuva taajuusmuuttajan rakenteesta on kuvassa 4.4.



**Kuva 4.4** Taajuusmuuttaja ACS800-77LC ilman ovia (ABB 2007, s. 26)

## 4.3 Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteina toimivat kaksi eri tuotekehitysprosessin vaiheessa olevaa projektia. Tällä tavoin saadaan tietoa siitä, missä vaiheessa tuotekehitysprosessia

kannattaa luotettavuustyökaluja käyttää. Toinen projekteista oli läpäissyt Gate 1:en, eli siinä suunniteltiin konsepteja ja toinen projekti oli läpäissyt Gate 3:n.

### 4.3.1 Tornado

Tornado on projektinimi tulevalle tuoteperheelle. Tämä projekti oli konseptin suunnitteluvaiheessa (Stage 1). Projektissa oli tehty kaksi erilaista konseptia, joiden kehittämistä jatkettiin aina seuraavaan Gate-kokoukseen asti. Luotettavuusanalyyseillä pyrittiin vertailemaan näitä kahta eri konseptia. Tässä tutkimuksessa käytetään näistä konsepteista nimiä A ja B. Koska konseptit olivat vielä suunnitteluvaiheessa, eivät ne olleet vielä joka kentän osalta valmiita. B-konseptissa oli suunniteltu kaikkia kenttiä, kun taas A-konseptissa oli suunnittelussa keskitytty ainoastaan INU- ja ISU-kenttiin. Tämän takia analyyseissä kuviteltiin A-konseptin muut kentät samanlaisiksi kuin B-konseptissa.

### 4.3.2 Wild Cowberry

Wild Cowberry on projektinimi tulevalla tuoteperheelle. Tämä projekti oli edennyt jo ohi kolmannen Gate:n. Tuotteesta oli jo suunniteltu ja valmistettu prototyyppi ja se lähestyi Gate 4:ä. Tutkimuksessa olevassa taajuusmuuttajassa oli myös mukana sisään tuloyksikkö (Incoming Unit, ICU). Luotettavuusanalyyseillä oli tarkoitus löytää taajuusmuuttajasta sellaisia seikkoja, jotka vaikuttivat sen luotettavuuteen.

## 4.4 Tiedonkeruutavat

Tutkittavat luotettavuustyökalut olivat: syy-seuraus-analyysi (Ishikawa diagram), vika- ja vaikutusanalyysi (FMEA) ja vikapuuanalyysi (FTA). Nämä luotettavuustyökalut valittiin kirjallisuustutkimuksen, työkalujen ominaisuuksien (ks. luku 2.2.4) ja ABB:n käyttökokemusten perusteella. Analyysien asiantuntijaryhmiksi valittiin molempiin projekteihin omissa projekteissaan mukana olevia mekaniikkasuunnittelijoita sekä yksi sähkösuunnittelija. Itse toimin molemmissa ryhmissä analyysien vetäjänä ja ohjasin niiden kulkua ja toteutusta. Lähtötietoina analyyseissä oli asiantuntijoiden tieto ja kokemus. Näillä asiantuntija valoinnoilla pyrittiin siihen, että saatiin mahdollisimman kattavat tulokset analyyseistä ja niiden käyttömahdollisuuksista. Molempiin projekteihin liittyvät analyysit tehtiin kahden eri tapaamisen aikana. Analyysit tehtiin osittain samanaikaisesti, hyödyntäen ensimmäisen tapaamisen aikana saatuja vika- ja vaikutusanalyysin tuloksia.



Ennen analyysien tekemistä asiantuntijoiden kanssa käytiin eri luotettavuustyökalut läpi esimerkkien kanssa. Lisäksi kerrottiin mitä luotettavuustyökaluja tapaamiskerralla oli tarkoitus käyttää. Esimerkkien lisäksi analysoijille jaettiin mekaniikkasuunnittelijan näkökulmasta tehty tuotteen lohkokaavio, helpottamaan tuoterakenteen ymmärtämistä.

#### **4.4.1 Syy-seuraus-kaavion tekeminen**

Syy-seuraus-analyysiä käytettiin ensimmäisenä luotettavuustyökaluna. Ongelmaksi päätettiin: Taajuusmuuttaja vikaantuu. Syy-seuraus-kaaviota oli myös tarkoitus käyttää silloin kun löydetään sellainen vikaantuminen vika- ja vaikutusanalyysistä tai vikapuuanalyysistä, jolla oli vakavat seuraukset ja siihen voi vaikuttaa monia eri tekijöitä. Loppuanalyysi tehtiin luvun 3.3.2 mukaan. Analyysin kuvaaja tehtiin MS Office Visio-ohjelmalla ABB:n analyysipohjalle.

#### **4.4.2 Vika- ja vaikutusanalyysin tekeminen**

FMEA-työkalu otettiin käyttöön alun syy-seuraus-kaavion jälkeen. Analyysi aloitettiin tutustumalla tuotteen lohkokaavioon. Koska ryhmä ja tavoitteet oli jo päätetty, jatkettiin analyysin tekemistä, kuten luvussa 3.4.3 on esitetty. Jotta tuotteen rakenne muistui analysoijien mieleen, hyödynnettiin analyysin aikana lohkokaavion ohella myös tuotteesta tehtyä CAD-mallia. Vika- ja vaikutusanalyysi tehtiin ABB:n nykyiselle analyysipohjalle (liite 3) käyttäen pohjassa mukanaolevia arviointiasteikoita (liite 2). Toisen kerran FMEA:ta käytettiin toisella tapaamiskerralla vikapuuanalyysin jälkeen. Tällöin saatiin viimeisteltyä ensimmäisellä kerralla aloitettu tuotteiden vika- ja vaikutusanalyysit.

#### **4.4.3 Vikapuuanalyysin tekeminen**

Toinen tapaaminen aloitettiin FTA:lla. Vikapuuanalyysi tehtiin sille vika- ja vaikutusanalyysissä ilmenneelle vialle, jonka RPN oli ensimmäisellä tapaamiskerralla suurin. Vikapuuanalyysin huipputapahtumaksi valittiin tämä vakavin vika. Loppuanalyysi eteni kuten luvussa 3.5.2. Vikapuuanalyysi tehtiin MS Office Visio-ohjelmalla puukuvaajan pysyessä hallittavan kokoisena.



## 5 TUTKIMUSTULOKSET

Tässä luvussa esitetään analyyseissä saadut tutkimustulokset. Ensin esitetään analyysien aluksi tehdyt syy-seuraus-kaaviot. Seuraavaksi esitetään vika- ja vaikutusanalyysillä tehdyt taulukot. Luvun lopuksi käydään läpi vikapuuanalyysillä saadut puukuvaajat.

### 5.1 Syy-seuraus-analyysi

Syy-seuraus-analyysin avulla saatiin aloitettua luotettavuusanalyysit helposti ja avoimin mielin. Molemmissa analyyseissä tutkittiin samaa ongelmaa: Taajuusmuuttaja vikaantuu. Kaavioita tehtiin yksi liittyen molempiin tuotteisiin. Molempien projektien analysoijat totesivat, että syy-seuraus-kaavion täyttäminen oli yksinkertaista.

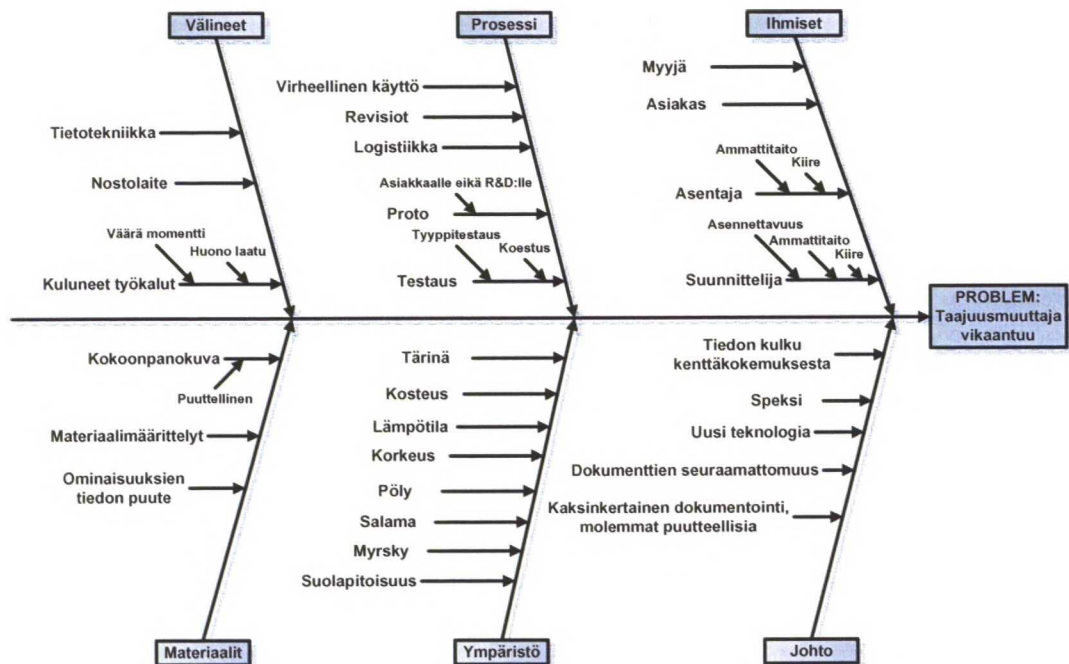
Kaavioihin 5.1 (ks. s. 60) ja 5.2 (ks. s. 61) kirjattiin samoja syitä, koska molempien analyysien ongelmat olivat samat. Tästä huolimatta Tornadon analyysin syyt kokoonpanokuvien puutteellisuus sekä kaksinkertainen dokumentointi ja Wild Cowberryn analyysin syy asennusohjeiden virheellisyys, joilla tarkoitettiin osittain samaa asiaa, laitettiin eri kategorioihin. Tornadon yhteydessä todettiin myös, että asentajien ammattitaidon puute saattaa johtaa vikaantumisiin, kun taas Wild Cowberryn yhteydessä todettiin asentajien liiallisen ammattitaidon aiheuttavan mahdollisia vikaantumisia.

Molempia analyysejä tehdessä keskusteltiin viallisesta komponentista ja sen aiheuttamista jännityksistä ja ilmavälien pienenemisestä. Tämä viallinen komponentti-syy kirjattiin Wild Cowberryn kuvaajaan, mutta Tornadon analyysissä asiantuntijat eivät kirjanneet ongelmaa.

#### 5.1.1 Syy-seuraus-analyysi – Tornado

Tornadolle tehdyssä syy-seuraus-kaaviosta löytyi kattavasti erilaisia syitä taajuusmuuttajan vikaantumiseksi. Kuvassa 5.1 on Tornadon analyysissä tehty syy-seuraus-kaavio.

Ihmiset-kategoriassa syyllä ”Asiakas” tarkoitettiin myös projektin omistajaa, tuotteen ostajaa ja käyttäjää. Prosessi-kategoriassa ”Revisiot” -syyllä tarkoitettiin revisioiden vaihtumista suunnitteluprosessissa ja niiden tarkkaa seuraamista myös myöhemmässä valmistus- ja kokoonpanotehtävissä. Syyllä ”Kaksinkertainen dokumentointi, molemmat puutteellisia” tarkoitettiin sitä, että joudutaan tekemään asennusohjeita ja kokoonpanokuvia, jolloin ei voida keskittyä tarpeeksi vain yhteen dokumenttiin. Tähän samaan ongelmaan viitataan myös Materiaalit-kategoriassa kokoonpanokuvan puutteellisuudella.



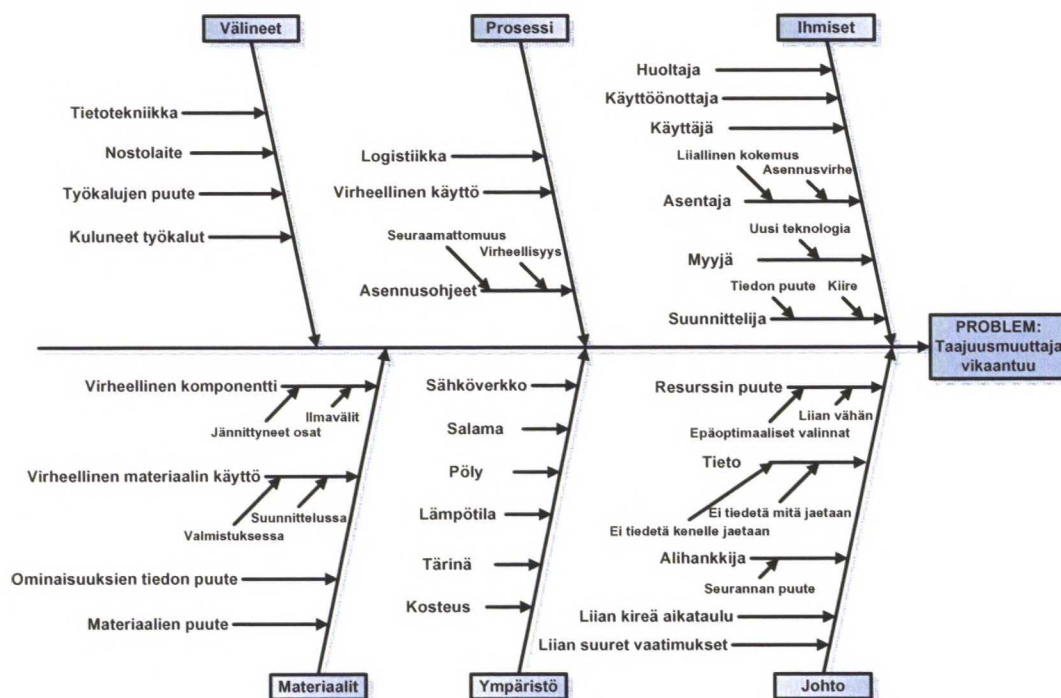
**Kuva 5.1** Tornadolle tehty syy-seuraus-kaavio: Taajuusmuuttaja vikaantuu

Materiaali-kategoriaan löydettiin vähiten syitä, minkä lisäksi kategorian syitä voisi osittain myös yhdistää, jolloin materiaaleista johtuvia syitä olisi vieläkin vähemmän. Kokoonpanokuvien puutteellisuuden olisi voinut yhdistää Johto-kategorian ”Kaksinkertainen dokumentointi, molemmat puutteellisia” syyn kanssa. Helpoiten kategorioista täyttyi Ympäristö.

### 5.1.2 Syy-seuraus-analyysi – Wild Cowberry

Wild Cowberrylle tehdyssä syy-seuraus-kaaviossa löytyi taajuusmuuttajan vikaantumisien syitä läpi koko tuotteen elinkaaren aina alkuvaatimuksista huoltoon

asti. Wild Cowberryn analyysin yhteydessä tehty syy-seuraus-kaavio esitetään kuvassa 5.2.



**Kuva 5.2** Wild Cowberrylle tehty syy-seuraus-kaavio: Taajuusmuuttaja vikaantuu

Ihmiset-kategorian alle ryhmiteltiin eri henkilöt tarkasti. Toisaalta vaikka osa syistä pilkottiinkin yksikäsitteisiksi, niin silti esimerkiksi Prosessi-kategoriassa olevalla Syyllä ”Asennusohjeet” tarkoitettiin asennusohjeita ja kokoonpanokuvia. Kuten Tornadonkin kaaviossa, myös tässä Ympäristö-kategorian syiden keksiminen sujui helpoiten.

Johto-kategoria saatiin täytettyä hyvin monilla eri syillä. Monet tämän kategorian syyt tulivat tämän projektin aikaisista kokemuksista ja osa syistä tuli taas aikaisempien kokemusten perusteella. Loput Johto-kategorian syistä tulivat olettamusten ja kuulopuheiden perusteella.

Analyysien jälkeen osallistujat totesivat, että oli hyödyllistä nähdä kuinka moni eri asia voi vaikuttaa taajuusmuuttajan vikaantumiseen. Analyysin tekovaiheessa haasteellisin asia oli sopivien sanojen löytäminen syille.



## 5.2 Vika- ja vaikutusanalyysi

Vika- ja vaikutusanalyysistä saatiin hyviä tuloksia ja paljon erilaisia vikaantumistapoja. Riskiluvut vaihtelivat kahden ja 336:n välillä. Molemmista analyysistä löytyi myös samoja vikaantumistapoja, johtuen samankaltaisesta rakenteesta ja komponenteista. Vika- ja vaikutusanalyysistä ei löytynyt sellaisia vikoja, joille olisi koettu tarpeelliseksi tehdä uusi syy-seuraus-analyysi.

Analyysien tuloksena saaduissa taulukoissa 5.1 (ks. s. 63) ja 5.2 (ks. s. 65) on ilmoitettu Osa-sarakkeessa mahdollinen kenttä, jos vikaantuminen liittyi ainoastaan tiettyyn kenttään. Jos Osa-sarakkeessa on ainoastaan ilmoitettu osa tai toiminto, voi vikaantuminen tapahtua useammassa kentässä.

Vaikeana asiana vika- ja vaikutusanalyysissä pidettiin riskiluvun kertoimien eli kriittisyyden, todennäköisyyden ja havaittavuuden määrittämistä. Molemmat analyysit pysyivät kuitenkin suhteellisen hyvin samoilla linjoilla kertoimia määrittellessä. Tästä syystä riskit ovat vertailukelpoisia muiden saman analyysin riskien kanssa.

### 5.2.1 Vika- ja vaikutusanalyysi – Tornado

Tornadon vika- ja vaikutusanalyysissä tarkoituksena oli vertailla kahden eri konseptin välisiä eroja. Näitä eroja saatiin INU- ja ISU-kentistä yhteensä yhdeksän kappaletta. Tämän lisäksi muistakin kentistä löydettiin mahdollisia vikaantumistapoja. Tornadolle tehty vika- ja vaikutusanalyysi on osittain taulukossa 5.1. Taulukosta on jätetty tutkimuksen kannalta epäoleelliset sarakkeet pois. Täydellinen taulukon pohja on liitteessä 3. Eri konsepteissa esiintyvät mahdolliset viat on nimetty sen mukaan joko A:lla tai B:llä. Viat jotka esiintyvät molemmissa konsepteissa on esitetty Osa-sarakkeessa joko tiedolla missä kentässä se tapahtuu tai ilman edellistä tietoa, jos se voi tapahtua useassa eri kentässä.



Taulukko 5.1 Osa Tornadon vika- ja vaikutusanalyysistä

Nro	Osa Toiminto	Mahdollinen vikaantumis- tapa	Mahdollinen vikaantumisen vaikutus	KRIITTISYYS (SEVERITY)	Mahdollinen syy vikantumis- tavalle	TODENNÄKÖISYYS (OCCURRENCE)	Nykyinen suunnittelu- kontrolli	HAVAITTAVUUS (DETECTION)	RISKIN PRIORISOINTINUMERO
1	A/puhallin/ilmankierto	Epätasainen ilmankierto	Epätasainen lämpeneminen	2	Testaus, simulointi, suunnittelu	1	Lämpöajo, simulointi	1	2
2	A/nestekierto	Ilma ei poistu	Paikka ylikuumenee	3	Testaus, simulointi, suunnittelu	1	Lämpöajo	4	12
3	B/nestekierto	Ilma ei poistu	Paikka ylikuumenee	2	Testaus, simulointi, suunnittelu	1	Lämpöajo	4	8
4	B/Generaattorikaapelien liitos	Ruuvitippuu moduliin	Oikosulku	10	Huolimatto- muus asennuksessa	6	Visuaalinen tarkastus	2	120
5	B/AC-sulake liitos	Ruuvitippuu moduliin	Oikosulku	10	Huolimatto- muus asennuksessa	6	Visuaalinen tarkastus	2	120
6	B/Brakechopper kaapelien liitos	Ruuvitippuu moduliin	Oikosulku	10	Huolimatto- muus asennuksessa	6	Visuaalinen tarkastus	2	120
7	A/Runkopalkit kulmassa	Basebeamin ja pystytolpan liitos aukeaa	Runko heikkenee	7	Nostovaiheessa paljon painoa	1	Simulointi	5	35
8	B/Runkopalkit kulmassa	Basebeamin ja pystytolpan liitos aukeaa	Runko heikkenee	6	Nostovaiheessa paljon painoa	1	Simulointi	5	30
9	B/Kiskot	Kiskot ovat liian kuumia	Tukieristimet sulavat	2	Ilmankierron kannalta vaikea hallita	1	Simulointi, Lämpöajo	1	2
10	ACU-kenttä	Yliämpö	Elektroniikka vikaantuu	10	Huono jäähdytys	1	Simulointi, Lämpöajo	5	50
11	ACU-kenttä	Magneettiset häiriöt	Elektroniikka häiriintyy	7	Eristyksen, suojauksen puute, liian lähellä häiriölähteitä	6	Koestus	8	336
12	ICU/ LCL-konkka	Yliämpö	Komponentin elinikä laskee	8	Huono jäähdytys	1	Simulointi, Lämpöajo	2	16
13	ICU/ Latauslevy	Yliämpö	Komponentin elinikä laskee	8	Huono jäähdytys	1	Simulointi, Lämpöajo	2	16
14	Puhallin	Yliämpö	Kenttä kuumenee	8	Puhallin vikaantuu, sähköt häviää	2	Klixon	8	128
15	ICU/ Konkan oikosulkusuojaus	Kondensaattori n sisäinen oikosulku	ICU-kenttä tuhoutuu (Valokaari)	10	Komponentti vika	2	-	9	180
16	ICU/ Katkaisija	Yliämpö	Komponentin elinikä laskee	8	Huono jäähdytys	7	Simulointi, Lämpöajo	2	112
17	LCL/ Kuristin	Taivutetaan kiskoja, jotta saadaan liitettyä	Kiskot jännityksen alaisina	8	Liian suuret kuristimen valmistus toleranssit	6	Visuaalinen tarkastus	1	48
18	LCL/ Kuristin	Yliämpö	Käytön pysäytys	8	Huono jäähdytys	1	Simulointi, Lämpöajo	2	16
19	LCL/ Kuristin	Vesi kiehuu nestekierron pysähtyttyä	Jäähdytysputki hajoaa, komponentit on vaihdettava	10	Nestekierto pysähtyy	2	Tyypitesti	2	40
20	Nestekierto	Yksittäinen putki tukkeutuu	Komponentit kuumenevat	7	Litistynyt putki	5	Visuaalinen tarkastus	3	105

Taulukon 5.1 alussa on vikoja, jotka esiintyivät vain toisessa konseptissa. Suurimmat riskiluvut johtuivat siitä, että B-konseptissa kiinnitysosien oli mahdollista tippua moduulin sisälle. Näitä vikaantumistapoja oli kolme kappaletta, joille kaikille RPN:ksi tuli 120. Nestekierrossa mahdollisesti tapahtuvassa ilman jumittumisessa B-konsepti on hieman luotettavampi kuin A-konsepti. Myös kaapin nostotilanteessa mahdollisesti tapahtuvassa runkotolppien liitoksen heikkenemisessä B-konsepti sai hieman pienemmän riskiluvun kuin A-konsepti.

Riskilukujen perusteella A-konsepti olisi huomattavasti luotettavampi kuin B-konsepti. Myös havaittujen vikaantumistapojen määrän mukaan A-konsepti olisi luotettavampi konseptivalinta. Mutta samanlaisissa vioissa B-konseptin kanssa A-konsepti saa suuremmat riskiluvut.

Muissa kuin INU- ja ISU-kentissä tapahtuvia mahdollisia vikaantumistapoja löydettiin muutama enemmän kuin vain toisessa konseptissa esiintyviä. Näistä suurimman RPN:än 336 sai ACU-kentän mahdolliset magneettiset häiriöt. Lähes puolet yhteisistä löydetyistä vikaantumistavoista saivat RPN:ksi yli 100. Huomattavaa on myös se, että muutama vikaantumistapa, jonka kriittisyys oli 10, jäi riskiluvultaan reilusti alle 100:n.

Suunnitteluvaiheessa olevien konseptien arvioiminen oli osittain hankalaa, sillä ne eivät olleet vielä valmiita. Tämän takia muutamat kriittisyysarvot ja todennäköisyys saivat huomattavan pienen arvon, koska kyseiset vikaantumistavat ja niiden vaikutukset tulevat todennäköisesti poistumaan suunnittelun edetessä.

### **5.2.2 Vika- ja vaikutusanalyysi – Wild Cowberry**

Wild Cowberryn vika- ja vaikutusanalyysin tarkoituksena oli löytää taajuusmuuttajan mahdolliset vikaantumistavat. Analyysissä löydettiin jokaisesta kentästä mahdollisia vikaantumistapoja. Wild Cowberryn vika- ja vaikutusanalyysi on osittain taulukossa 5.2. Taulukosta on jätetty tutkimuksen kannalta epäoleelliset sarakkeet pois. Täydellinen tutkimuksessa käytetty analyysipohja on liitteessä 3.



Taulukko 5.2 Osa Wild Cowberryn vika- ja vaikutusanalyysiä

Nro	Osa Toiminto	Mahdollinen vikaantumis- tapa	Mahdollinen vikaantumis- vaikutus	KRIITTISYYS (SEVERITY)	Mahdollinen syy vikaantumis- tavalle	TODENNÄKÖISYYS (OCCURRENCE)	Nykyinen suunnittelu- kontrolli	HAVAITTAUUS (DETECTION)	RISKIN PRIORISOINTINUMERO
1	Puhallin	Vikaantuu	Kenttä kuumenee	4	Laakeri, sähkö	1,5	Valmistaja	9	54
2	Puhallin	Vikaantuu	Laite lopettaa toiminnan	8	Laakeri, sähkö	1,5	Valmistaja	1	12
3	Nestekierto	Väärä nesteen lämpötila	Moduli hajoaa	7	Väärä määritelmä, asiakas käyttää väärän lämpöistä nestettä, väärä seossuhde	1	Määritelmässä lukee	7	49
4	Nestekierto	Väärä paine/virtaus	Moduli hajoaa	7	Putki tukossa, vika pumpussa, putki vuotaa, asennusvirhe	2	Painetesti, painemittari	1	14
5	Nestekierto	Putki vuotaa	Moduli hajoaa	8	Putki viallinen, asennus huono	1	Painetesti, painemittari	1	8
6	Nestekierto	Neste kondensoituu	Komponentit kastuvat	7	Ympäristö vaikuttaa	3	Kuljetuksen aikana suolapussit keräävät kosteuden	10	210
7	Kisko	Ylikuumenee	Pinnote sulaa	8	Alimitotettu	1	Lämpöajo, lämpösimulointi	10	80
8	Kisko	Liikkuu	Valokaari	10	Tärinä	1	Ilmaväliit suunnittelussa, UL-mittaukset	10	100
9	Kisko	Liikkuu	Valokaari	10	Huono liitos	3	Kiristyksestä visuaalinen tarkastus	3	90
10	Modulin pääiset kiinnitysosat	Osa tippuu modulin sisälle	Oikosulku	8	Huolimattomuus	1	Visuaalinen tarkastus	2	16
11	Modulin pääiset kiinnitysosat	Osa tippuu modulin sisälle käytön aikana	Oikosulku	8	Löysä liitos ja tärinä	1	Visuaalinen tarkastus	9	72
12	LCL/Kondensaattorin liitos	Liitokset murtuvat	Komponentti hajoaa	8	Logistiikasta johtuva tärinä	3	Joustavat liitokset	7	168
13	LCL/Kuristin	Taiutetaan kiskoja->kiskot jännittyneet	Rikkoo kondensaattorin liitokset	8	Suuret toleranssit	2	Oma toleranssi	9	144
14	LCL/Kuristin	Taiutetaan kiskoja->kiskot jännittyneet	Kuristin hajoaa	8	Suuret toleranssit	1	Oma toleranssi	9	72
15	LCL/Kuristin	Taiutetaan kiskoja->kiskot jännittyneet	Ilmaväliit katoaa, valokaari	10	Suuret toleranssit	1	Oma toleranssi	4	40
16	ICU200	Kenttä kaatuu	Loukkaantumisriski	10	Painopiste korkealla ja kaappi on kapea	1	Käsitellään jalustalla	1	10
17	ICU200	Kenttä kaatuu	Kaappi vikaantuu	7	Painopiste korkealla ja kaappi on kapea	1	Käsitellään jalustalla	1	7
18	ICU200	Lämmittää LCL-kenttää	LCL-kentän komponentit käyvät liian kuumana, elinikä laskee	7	Jäähdytyksen, ilmankierron puute	2	Lämpöajo	1	14
19	ACU/ Liukulevy	Pidätin ruuvit unohtuvat	Liukulevy voittuu ja telkeää kentän oven	7	Huolimattomuus, virheelliset kokoonpanokuvat (hajoaa logistiikassa)	3	Visuaalinen tarkastus	1	21



Nesteen kondensoituminen sai suurimman riskiluvun 210. Yli sadan olevia mahdollisia vikaantumistapoja oli vain muutama. Vaikka kriittisyydeltään arvon kymmenen saaneita vikaantumistapoja löydettiin neljä, ainoastaan yksi niistä ylsi riskiluvultaan 100:n. Huomattavaa on, että vikaantumistavasta ”kenttä kaatuu” aiheutuva mahdollinen loukkaantuminen sai RPN:ksi vain kymmenen, mutta silti sen kriittisyys oli kymmenen. Tämä siksi että kentän kaatuessa todettiin mahdollinen ihmisen loukkaantumisriski, joka kuitenkin oli epätodennäköinen.

Moni vioista oli sellaisia, että ne voivat tapahtua useammassa kuin yhdessä kentässä. Tämä johtui siitä, että esimerkiksi ISU- ja INU-kenttien puhaltimet ovat samanlaisia ja niitä käytetään molemmissa kentissä samalla lailla. Koska sähkö johdetaan suurimmaksi osaksi kiskoissa, niitä on lähes joka kentässä, minkä takia ne voivat vikaantua usealla eri tavalla monissa eri paikoissa.

Nestejäähdetyksestä johtuvat viat olivat myös sellaisia, että ne voivat tapahtua useammassa kentässä. Tämä puolestaan siksi, että lähes jokaisen kentän läpi viedään nestejäähditys. Mahdollisia vikoja useassa kentässä korostaa myös se, että nestekierto on yksi yhtenäinen, eli vikaantuminen jossain kohtaa vikaannuttaa todennäköisesti myös muita kohtia.

ACU-kentän liukulevyn vioittumiseen johtava syy aiheutti välittömiä korjaustoimenpiteitä, sillä analyysin aikana huomattiin kyseisten pidätinruuvien puuttuvan kokoonpanokuvasta.

### 5.3 Vikapuuanalyysi

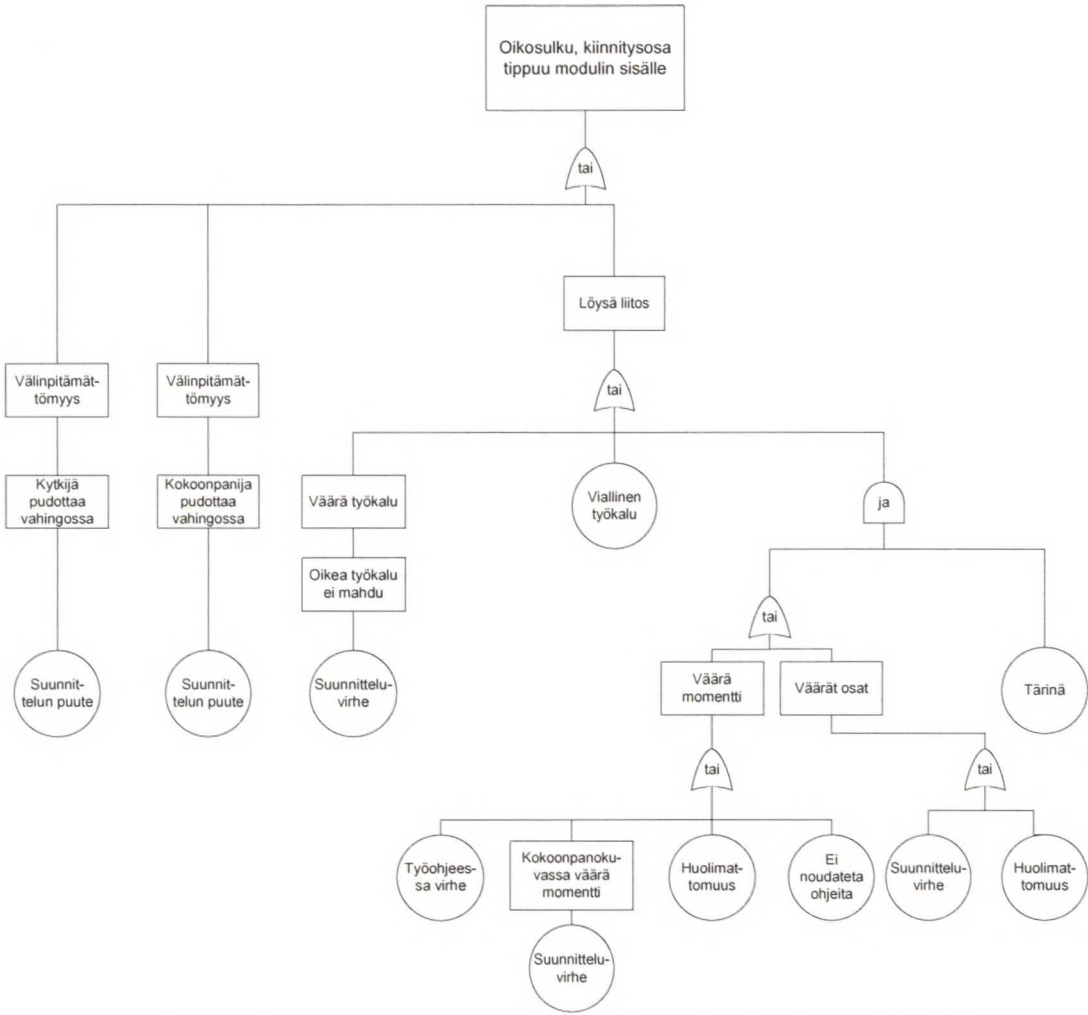
Vikapuuanalyysiä käytettiin molempien projektien yhteydessä analysoimaan sellainen vika, jolla oli suuri riskiluku niiden vika- ja vaikutusanalyyseissä. Molemmissa analyyseissä huipputapahtumaksi valittiin ensimmäisen analysointikerran riskiluvultaan suurin vika. Koska vika- ja vaikutusanalyysin tulosten perusteella näytti siltä, että mahdolliset vikaantumismekanismit olivat yksinkertaisia, ei vikapuuanalyysijä tehty yhtä enempää.

Molemmat analyysit jakautuivat selkeästi muutamaan päähaaraan. Näistä haaroista erilaisia perusvikatapahtumia löytyi molemmista analyyseistä monia. Monet näistä

tapahtumista olivat sellaisia, että ne tapahtuivat itsenäisesti ilman mitään muuta tapahtumaa.

5.3.1 Vikapuuanalyysi – Tornado

Tornadon vikapuuanalyysin huipputapahtumaksi valittiin kiinnitysosan tippumisesta modulin sisälle johtuva oikosulku. Tämä vika oli mahdollista kolmella eri vikaantumistavalla, jotka kaikki saivat riskiluvuksi 120. Vika- ja vaikutusanalyysin mukaan kyseinen vika oli huomioitava vain B-konseptissa. Tornadon vikapuuanalyysi on kuvassa 5.3.



Kuva 5.3 Tornadon vikapuuanalyysi modulin sisälle tippuneen kiinnitysosan aiheuttamalle oikosululle

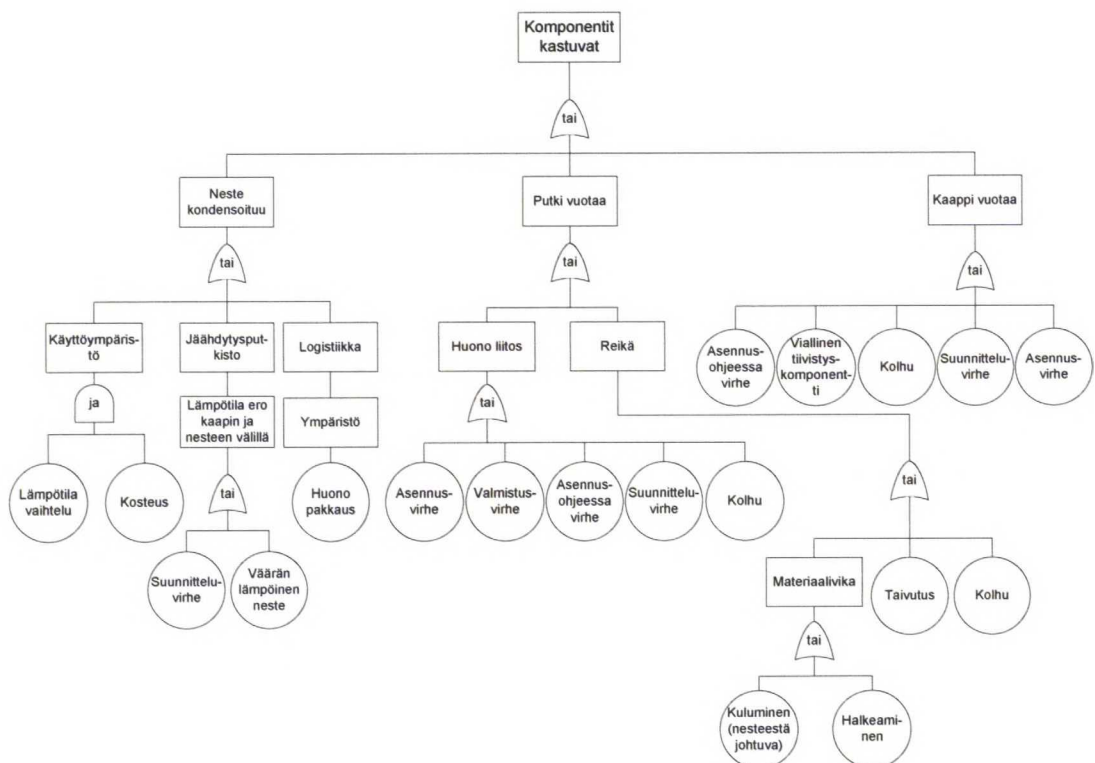
Vikapuun haarat jakaantuivat selvästi ihmisen välinpitämättömyyteen ja löysään liitokseen, jolle perusvikatapahtumia löytyi monia. Kaikista perustapahtumista noin puolet oli jonkinlaisia suunnittelun puutteellisuuksia tai sen virheitä. Liitosten

tekijöiden huolimattomuus ja välinpitämättömyys olivat myös selkeästi asioita, jotka vaikuttivat suuresti mahdolliseen ruuvien tippumiseen. Voidaan siis todeta, että monissa tapahtumaketjuissa syynä oli jonkinlainen huolimattomuus tai välinpitämättömyys.

Vaikka perusvikatapahtumat johtuivatkin lähes aina ihmisestä, vaativat useat niistä seuraukseen tärinän. Näiden toteutuessa kiinnitysosien oli mahdollista pudota modulin sisään löysien liitosten takia. Ihmisestä riippumaton perustapahtuma oli viallinen työkalu.

### 5.3.2 Vikapuuanalyysi – Wild Cowberry

Wild Cowberryn vikapuuanalyysin huipputapahtumaksi valittiin ”Komponentit kastuvat”. Vika- ja vaikutusanalyysissä tämä sai riskiluvuksi 210, joka oli kyseisen analyysin suurin. Kuvassa 5.4 on Wild Cowberryn vikapuuanalyysin puukuvaaja.



**Kuva 5.4** Wild Cowberryn vikapuuanalyysi kastuville komponenteille

Komponenttien kastuminen jakautui kolmeen eri osaan: neste kondensoituu, putki vuotaa ja kaappi vuotaa. Erilaisia perusvikatapahtumia löytyi yli kymmenen, joista suunnittelussa tapahtunut virhe löydettiin jokaisesta puun kolmesta päähaarasta.



Vikapuuanalyysin perusvikatapahtumat jakautuivat laajalti moneen erilaiseen kategoriaan. Asennustapahtumassa tapahtuva virhe oli yksi mahdollinen syy putken tai kaapin vuotamiseen. Myös valmistuksessa tapahtuvat virheet saattavat johtaa putken tai kaapin vuotamiseen. Ihmisistä johtuvien virheiden lisäksi Wild Cowberryn komponenttien kastuminen voi tapahtua ympäristön tai logistiikan takia.

Valtaosa perusvikatapahtumista ei vaatinut mitään muuta tapahtumaa tapahtuakseen, vaan ainoastaan perusvian tapahtuminen riittää komponenttien kastumiseen. Ainoastaan lämpötilan vaihtelu ja kosteus ovat sellaisia tapahtumia, jotka vaativat toisensa aiheuttaakseen huipputapahtuman.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Luvun alussa esitetään luotettavuustyökaluittain tutkimustulosten johtopäätökset ja suositukset työkalujen käytöstä. Vika- ja vaikutusanalyysissä käytettävästä pohjasta on tehty kehitysehdotus, joka vastaa paremmin taajuusmuuttajan mekaniikkasuunnittelun tarpeita. Seuraavaksi esitellään muita suosituksia luotettavuuden parantamiseksi. Luvun lopussa on johtopäätöksiä ja suosituksia työkalujen käytöstä tuotekehityksen eri vaiheissa.

### 6.1 Syy-seuraus-analyysi

Konseptin suunnitteluvaiheessa olevalle Tornadolle tehdyssä syy-seuraus-kuvaajassa on selvästi nähtävissä suunnitteilla olevan tuotteen piirteitä. Tämä johtuu siitä, että analysoitava tuote oli vielä suunnitteluvaiheessa ja näin ollen ajateltiin tulevia vaiheita tuotekehityksessä. Erityisiä piirteitä, jotka kuvastavat hyvin ajattelua uudesta tuotteesta, ovat prototyypin joutuminen asiakkaan eikä tuotekehityksen käyttöön. Lisäksi todettiin, että asentajien liian vähäinen ammattitaito tuo ongelmia erityisesti prototyyppien kokoamisessa. Alussa olevan projektin piirteitä korostaa myös se, että asiakkaaksi ajateltiin projektin omistaja.

Toisin kuin Tornadossa, pidemmälle edenneen Wild Cowberryn syy-seuraus-kaaviossa näkyy enemmän syitä liittyen valmiimpaan tuotteeseen. Esimerkiksi asentajien kokemus todettiin mahdolliseksi syyksi vikaantumiselle, sillä he toimivat niin kuin on ennenkin toimittu, eivätkä välttämättä tarkasta uusimpia revisioita kokoonpanokuvista. Myöskään projektin omistajaa ei tullut mainituksi kuvaajassa tai analyysin teon yhteydessä.

Osa kuvaajien syistä jätettiin liian laajoiksi ja siten osin epäselviksi mitä kaikkea sillä tarkoitettiin. Hyvänä esimerkkinä on Tornadon kaaviossa esiintyvä ”Asiakas”, jolla tarkoitettiin projektin omistajaa, tuotteen ostajaa ja käyttäjää. Tämä kattava sisältö ei ilmene syystä ”Asiakas” muille kuin analysoijille itselleen, eikä heillekään välttämättä enää myöhemmin. Tämän takia on tärkeää, että syyt eritellään tarpeeksi pitkälle, jotta ne on helpommin ymmärrettävissä ja niitä voidaan hyödyntää myöhemminkin.

Kaaviota oli yksinkertaista ja nopea täyttää. Kategorioista ”Ympäristö” täyttyi molemmissa analyysissä helpoiten. Lisäksi Ympäristö-kategoriat olivat suhteellisen samanlaisia. Analysoijien mielestä oli hyödyllistä nähdä kaikki eri tekijät, jotka vaikuttavat luotettavuuteen. Lähes kaikki mahdolliset syyt, jotka tulivat esille vika- ja vaikutusanalyysistä, löytyvät myös syy-seuraus-kaavioista, mikä kertoo syy-seuraus-kaavion tehokkuudesta. Kaavion täytössä haasteellisena pidettiin kuvaavien sanojen keksimistä sille.

Analyysin tekijöiden kokemus ja ammattitaito näkyi pienenä erona projektien kalanruotokaavioissa. Tämä näkyi analyysissä siten, että Tornadon kuvaajassa jätettiin merkitsemättä syyksi virheellinen komponentti, mikä Wild Cowberryn yhteydessä kirjattiin. Molemmissa tapauksissa tarkoitettiin samaa komponenttia. Todellisuudessa komponentti ei ollut virheellinen, vaan sillä oli suuret valmistustoleranssit. Tästä syystä komponenttia voidaan helposti luulla virheelliseksi.

Suoranaista hyötyä syy-seuraus-analyysillä ei ollut tutkittaessa tuotteen luotettavuutta. Kaavion avulla saatiin kuitenkin avattua analysoijien mieli niin, että löydettiin useimmat syyt vioille, jotka esiintyivät muissa luotettavuusanalyysissä. Kaapitettujen taajuusmuuttajien konseptien vertaileminen tällä työkalulla ei ole järkevää, elleivät konseptit ole täysin erilaisia. Konseptien ollessa samantyyllisiä, ovat myös niiden vikaantumissyöt samoja.

Syy-seuraus-kaavio tulee tehdä aina ennen projektin ensimmäistä luotettavuusanalyysiä. Tämän jälkeen kaaviota tarkastellaan aina ennen luotettavuusanalyysien tekoa tai päivittämistä. Tehtyä syy-seuraus-kaavioita voidaan myös tarvittaessa päivittää projektin edetessä. Kaavio tehdään ja päivitetään samassa kokouksessa luotettavuusanalyysin kanssa ja sen tekevät analyysin asiantuntijat.

Syy-seuraus-kaavion tarkoituksena on avata analysoijien ajatuksia ja samalla löytää jo valmiiksi mahdollisia syitä, mitä voi löytyä muiden analyysien yhteydessä. Kaaviota tehdessä voidaan hyödyntää myös muille tuotteille tehtyjä vanhempia analyyskejä. Tehtäessä yleinen luotettavuusanalyysi koko taajuusmuuttajalle analyysin ongelmaksi valitaan: Taajuusmuuttaja vikaantuu. Jos tehdään tarkempi



luotettavuusanalyysi jollekin alikokoonpanolle, tehdään sille oma syy-seuraus-kaavio ennen luotettavuusanalyysin tekoa.

Syy-seuraus-analyysiä voidaan käyttää yksinkertaisissa tapauksissa vikapuuanalyysin sijaan. Yksinkertaisissa tapauksissa, joissa löytyy ainoastaan monia perusvikatapahtumia, syy-seuraus-analyysi toimii hyvin. Tällöin useat perusvikatapahtumat eivät saa olla liian riippuvaisia toisistaan, jotta analyysi pysyy tarpeeksi yksinkertaisena. Toisin sanoen, mahdollisessa vikapuussa tulisi olla mahdollisimman vähän tai-portteja. Lisäksi syy-seuraus-kaaviota voidaan käyttää FMEA:n yhteydessä korvaamaan vikapuuanalyysin. Tällöin kaavion ongelmaksi sijoitetaan vika- ja vaikutusanalyysissä suuren riskiluvun saanut vika, joka muuten sijoitettaisiin vikapuuanalyysin huipputapahtumaksi.

## 6.2 Vika- ja vaikutusanalyysi

Tornadon konseptien vertailussa A-konsepti vaikutti riskilukujen perusteella luotettavammalta kuin B-konsepti. Tilanne saattaa kuitenkin olla vain hetkellinen, sillä suunnitteluja jatkettaessa B-konsepti voi osoittautua luotettavammaksi. Tämä johtuu siitä, että kiinnitysosien tippumismahdollisuuden estäminen moduulin sisään tekee B-konseptista A-konseptia luotettavamman. Tämä osoittaa sen, että vika- ja vaikutusanalyysi on kannattavampaa tehdä vasta hieman myöhemmässä vaiheessa, kun konseptit ovat pidemmälle suunniteltuja, mikäli resurssit sen sallivat. Toisaalta ilman tässä vaiheessa tehtyä analyysiä, olisivat löydettyt vikaantumismahdollisuudet löydetty vasta myöhemmässä vaiheessa suunnittelua, eikä niitä olisi siten voitu poistaa konseptista jo aiemmassa vaiheessa.

Tornadon analysoiminen oli haastavaa osittain siksi, että sen ollessa vielä konseptin suunnitteluvaiheessa ei kaikkia valmiita ratkaisuja vielä ollut. Lisäksi suunnittelijoilla oli omat mielikuvansa suunnittelun etenemisestä, jolloin osa mahdollisista vikaantumistavoista poistuisi suunnittelun edetessä. Näistä syistä riskiluvun kertoimien arvioiminen oli hankalaa. Ratkaisuna haasteisiin on tehdä analyysi hieman myöhemmin. Tällöin tulokset ovat todenmukaisempia ja korostavat suuremmilla riskiluvuilla ne viat, jotka tarvitsevat jatkotoimenpiteitä.

Analyyseistä löytyi erilaisia mahdollisia vikaantumisia paljon. Suurin riskiluku oli 336 ja monelle se oli yli 100. ABB:n vika- ja vaikutuspohjan mukaan riskiluku 64 ja sitä suuremmat ovat merkittäviä riskejä. Todellisuudessa nämä kaikki suuren riskiluvun riskit eivät kuitenkaan ole merkittäviä riskejä. Käytettäessä vika- ja vaikutusanalyysiä täytyy olla selkeät arviointiperusteet, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia itsensä ja parhaassa tapauksessa myös muiden analyysien kanssa. Jotta analyysit olisivat vertailukelpoisempia keskenään, kannattaa tarkkailla riskiluvun kertoimia vanhoista analyyseistä. Hyvänä esimerkkinä vertailukelpoisten tulosten vaikeasta saamisesta on, että Wild Cowberryn analyysissä kiinnitysosan aiheuttama oikosulku sai riskiluvuksi vain 16 ja 72. Tornadon analyysissä nämä arvot olivat 120, joten analysoijilla on siis suuri vaikutus sen tuloksiin, sillä kyseessä olivat käytännössä samat vikaantumistavat, joilla oli samat seuraukset. Näistä syistä analysoijien on oltava kokeneita luotettavuusanalyysientekijöitä, jotta he osaavat painottaa mahdollisia vikoja oikein.

Vika- ja vaikutusanalyysi tehdään ensimmäisen kerran, kun ensimmäiset konseptit alkavat olla valmiita. Jos on olemassa useampi mahdollinen konsepti, käytetään vika- ja vaikutusanalyysiä vertailemaan konsepteja ja löytämään niistä mahdollisia vikaantumistapoja. Kun suunnitteilla on vain yksi mahdollinen konsepti, tarkoituksena on tehdä alustava FMEA ja löytää konseptin mahdolliset vikaantumistavat. Perusteellinen analyysi tehdään siinä vaiheessa, kun osia suunnitellaan prototyyppiä varten. Analyysiä päivitetään sekä projektin edetessä että saadessa tietoa prototyyppien toiminnasta. Viimeisen kerran analyysiä päivitetään projektin lopussa, kun tuote on jo ollut käytössä ja siitä on saatu palautetta käyttäjien kokemuksista.

Taajuusmuuttajan vika- ja vaikutusanalyysissä on hyvä rajata tutkittavan systeemin rajaksi koko kaappi. Tutkittaessa pienempiä kokonaisuuksia systeemien rajaksi on hyvä määrittää yksittäiset kentät. Vielä pienemmissä kokonaisuuksissa alikokoonpanot voivat olla hyviä systeemin rajoja. Käymällä järjestelmällisesti läpi koko taajuusmuuttaja kenttä kerrallaan, voidaan todeta, että kaikkiin tarvittaviin osiin on keskitytty tarpeeksi. Määrittämällä systeemin rajat pienempiin kokonaisuuksiin kuten kenttiin, voidaan analyysin tekeminen jakaa helposti useampaan kokoontumiskertaan.

Täytettäessä FMEA-pohjaa kannattaa täyttää kaikki kohdat vaikka ne liittyisivätkin edelliseen komponenttiin tai vikaantumistapaan. Näin voidaan jälkeenpäin lajitella vikoja riskiluvun tai jonkin muun ominaisuuden mukaan, eivätkä ne ole sidottuina tiettyyn järjestykseen.

### 6.2.1 Vika- ja vaikutusanalyysin pohja

Nykyinen vika- ja vaikutusanalyysin pohja toimii hyvin moniin erityyppisiin analyysihin. Mekaniikkasuunnittelun kannalta taulukossa oli muutama turha sarake, kuten Arvo/Tyyppi ja Luokka. Näistä kumpaankaan ei tullut yhtäkään merkintää. Puutteena alkuperäisessä taulukossa oli, että siitä puuttui kohta, johon voi kirjoittaa kentän, jossa mahdollinen vikaantuminen tapahtuu. Liitteessä 4 on ehdotus uudesta pohjasta käytettäväksi vastaavissa analyyseissä. Pohjasta on poistettu sarakkeet Arvo/Tyyppi ja Luokka, joista ei ole huomattu olevan hyötyä analyysijä tehdessä. Pohjaan lisättiin Kenttä-sarake helpottamaan vikojen kuvaamista.

Lukemista nopeuttamaan ja helpottamaan uusi vika- ja vaikutusanalyysipohja värjää automaattisesti sellaiset luvut, jotka on syytä huomioida. Näitä ovat riskiluvut ja sen kertoimet, joilla on suuri arvo. Punaisella värjäytyvät riskiluvut 100 ja sitä suuremmat ja riskiluvun kertoimista arvot kymmenen. Oranssilla värjäytyvät riskiluvut 80–99 ja sen kertoimista arvot yhdeksän. Analyysin tulkitsemista helpottamaan taulukon arvoja voi lajitella haluttujen ehtojen mukaan, kuten esimerkiksi riskiluvun tai vikaantumiseen liittyvän kentän mukaan.

Riskiluvun kertoimien kriittisyys, todennäköisyys ja havaittavuus täytyy olla helpommin päätettävissä, jotta vika- ja vaikutusanalyysin tekeminen olisi helpompaa ja nopeampaa. Tästä syystä riskiluvun kertoimien luokkia kuvaavan tekstin täytyy olla jotenkin liitoksissa taajuusmuuttajaan, eikä vain yleisesti teknologiaan saati esimerkiksi autoteollisuuteen. Selkeämmät kuvaukset sekä nopeuttavat analyysien tekoa että tekevät eri analyyseistä hieman helpommin vertailtavan, kun kertoimet ovat määritelty selkeästi. Ehdotukset kertoimien arvojen arvosteluasteikoista on taulukoissa 6.1, 6.2 ja 6.3.



Taulukko 6.1 Uusi kriittisyysasteikko

Kriittisyys		
Arvo	Kriteeri: Vian vaikutuksen kriittisyys	Luokka
Erittäin korkea	Osa hajoaa ja taajuusmuuttaja lopettaa toiminnan. Taajuusmuuttaja vikaantuu pahasti. Osia täytyy vaihtaa muitakin kuin vain alunperin hajonnut. <b>Ihmisen loukkaantumisriski.</b> Ei täytetä vaadittuja asetuksia. Esim. valokaari, vaihdetaan kaikki kentän moduulit/komponentit tai ei täytetä verkkovaatimukset.	10
		9
Hyvin korkea	Osa hajoaa ja taajuusmuuttaja lopettaa toiminnan. Ainoastaan hajonneen osan vaihtaminen riittää. Esim. vaihdetaan vain hajonnut moduli tai SACE.	8
Korkea	Osa hajoaa, taajuusmuuttaja toimii. Osan vaihto riittää korjaamiseen. Taajuusmuuttaja ei toimi suunnitellulla tavalla. Esim. puhallin hajoaa	7
Keskinkertainen	Taajuusmuuttaja ei toimi suunnitellulla tavalla. Esim. ylijännitesuoja lauennut, mutta käyttö toimii	6
		5
Matala	Pientä epätoimivuutta.	4
Hyvin matala	On epätodennäköistä, että vian vähäisen luonteen johdosta systeemin suoritustaso laskisi	3
Erittäin matala	Laite toimii suunnitellulla tavalla. Esim. pellit tärisevät, johdot ovat sekaisin	2
		1

Taulukko 6.2 Uusi todennäköisyysasteikko

Todennäköisyys				
Vikataajuus	Vian todennäköisyys	Luokka	Vikoja/ aikayksikkö [vuosi]	Vikoja/ taajuusmuuttaja
Erittäin suuri	Vika tapahtuu erittäin todennäköisesti.	10	1/2	10/1
		9	1/5	4/1
Suuri	Vika tapahtuu todennäköisesti.	8	1/10	2/1
		7	1/20	1/1
Keskinkertainen	Vika voi tapahtua.	6	1/40	1/2
		5	1/80	1/4
Matala	Vika on epätodennäköinen.	4	1/200	1/10
		3	1/400	1/20
Hyvin matala	Vika on hyvin epätodennäköinen.	2	1/800	1/40
		1	1/1600	1/80

**Taulukko 6.3** Uusi havaittavuusasteikko

<b>Havaittavuus</b>		
<b>Arvo</b>	<b>Ohje</b>	<b>Luokka</b>
Ei voi havaita	Seulonta ei voi havaita potentiaalista vikamekanismia, tai ei ole olemassa seulontaa. Esim. huomataan vasta käytössä vian tapahtuessa.	10
Ei havaita	Seulonta ei todennäköisesti havaitse potentiaalista vikamekanismia. Esim. voidaan huomata käytössä tai huollon yhteydessä.	9
Matala	Seulonta ei ehkä havaitse potentiaalista vikamekanismia. Voidaan huomata ennen käyttöönottoa. Esim. asennuksen tai logistiikan yhteydessä	8
		7
Keskinkertainen	Seulonta voi havaita potentiaalisen vikamekanismin. Voidaan huomata ennen toimitusta asiakkaalle. Esim. koetuksessa	6
		5
Suuri	Seulonnalla on hyvä mahdollisuus havaita potentiaalinen vikamekanismi. Esim. valmistuksessa ja asennuksessa.	4
		3
Hyvin suuri	Seulonnalla havaitaan erittäin todennäköisesti potentiaalinen vikamekanismi. Voidaan huomata ennen tuotteen julkaisua tai ennen tuotantoa. Esim. huomataan suunnittelussa, simuloinnissa tai tyypitestauksessa.	2
		1

Nykyinen riskilukuasteikko ei vastaa tarpeeksi niitä arvoja, joita tässä tutkimuksessa tehtyjen vika- ja vaikutusanalyysien tulokset ovat. Nykyinen merkittävän riskin raja 64 on liian pieni. Se tarkoittaa käytännössä noin 94 % luotettavuutta (ks. luku 3.4.5). Tällä arvolla noin puolet analyysien mahdollisista vioista olisi merkittäviä riskejä. Parempi arvo merkittävän riskin rajalle on 100, joka vastaa 90 % luotettavuutta. Tämä arvo vastaa analyysien vikojen mukaan suhteellisen hyvin sellaista rajaa, jota suuremmat viat ovat merkittäviä. Riskiluvultaan 100 ja sitä suurempia vikoja analyyseissä oli noin kolmannes. Vaikka teoreettisesti merkittävän riskin rajaksi tulee 90 % luotettavuus, ei se kuitenkaan ole täysin totta. Riskiluku voi vaihdella huomattavasti, sillä kuten aiemminkin on jo todettu, riippuu riskiluvun kertomien arvot analyysoijista. Yksi riskiluvun tärkeimmistä tehtävistä on korostaa analyyseissä esiin nousseet suurimmat riskit. Näistä syistä merkittävän riskin lukuarvoa täytyy pitää enemmänkin suuntaa-antavana kuin absoluuttisena totuutena. Ehdotus uudeksi riskilukuasteikoksi esitellään taulukossa 6.4. Jatkossa analyysejä tehdessä voi olla tarpeen päivittää riskilukuasteikkoa sen mukaan, miten riskiluvut analyyseissä jakautuvat.

**Taulukko 6.4** Uusi RPN-asteikko

RPN	
Arvo	Ohje
$1 \leq \text{RPN} < 50$	Vähäinen tuote ja/tai kaupallinen riski
$50 \leq \text{RPN} < 100$	Keskinkertainen riski. Voi vaatia suunnitelun ja/tai prosessin arviointia RPN-arvon pienentämiseksi.
$100 \leq \text{RPN}$	Merkittävä riski. Vaatii laajaan suunnitelun ja/tai prosessin arviointia RPN-arvon pienentämiseksi.

### 6.3 Vikapuuanalyysi

Kahden eri konseptin vertaileminen onnistuu vikapuuanalyysillä ainoastaan, jos molemmissa on samanlainen ongelma. Koska samat ongelmat johtuvat käytännössä samoista syistä, ei tällä työkalulla todennäköisesti löydetä kuin pieniä eroavaisuuksia. Konseptien vertailu tällä työkalulla ei siis ole järkevää.

Tehdyissä vikapuuanalyysissä monet perustapahtumat johtuivat suunnittelussa tapahtuvista virheistä. Nämä perusvikatapahtumat eivät todennäköisesti poistuisi, vaikka luotettavuutta parannettaisiinkin, sillä aina on olemassa mahdollisuus inhimillisiin virheisiin.

Kummassakaan puukuvaajassa ei ollut yhtä ja-porttia enempää, vaan valtaosa porteista oli tai-portteja. Tämä kuvastaa hyvin sen, että mekaaniset vikaantumiset eivät ole monimutkaisia, eivätkä siten ole riippuvaisia useasta eri samanaikaisesta tekijästä tai tapahtumasta. Tornadolle tehdystä vikapuuanalyysistä ilmenee, että tärinä on ehtona monelle perusvikatapahtumalle. Tärinän voimakkuus riippuu siitä, mihin kohtaan tuuliturbiinia taajuusmuuttaja asennetaan. Jos taajuusmuuttaja sijoitetaan tuuliturbiinin huippuun eli naseliin, tärinä on todennäköisesti voimakasta. Jos taajuusmuuttaja asennetaan tuuliturbiinin juureen, tärinä voi olla heikompaa kuin naselissa. Asennuspaikka riippuu tuuliturbiinin valmistajasta.

Puukuvaajissa oli monia haaroja, mutta silti niiden tapahtumaketjut eivät olleet kovinkaan monimutkaisia tai pitkiä. Tästä syystä yksinkertaisissa tapauksissa on järkevämpää käyttää syy-seuraus-kaaviota vikapuuanalyysin sijaan, sillä kalanruotokaavioon saadaan sijoitettua samat vikapuuanalyysin perusvikatapahtumat kaavion syiksi. Monimutkaisissa ja loogisuutta korostavissa tapauksissa on kuitenkin



järkevämpää käyttää vikapuuanalyysiä. Ennen analyysin aloittamista täytyy asiantuntijoiden päättää riittääkö syy-seuraus-kaavion tekeminen, vai vaatiiko kattavan analyysin tekeminen vikapuuanalyysiä.

## 6.4 Muita suosituksia luotettavuuden parantamiseksi

Luotettavuustyökalujen tehokas käyttö edellyttää sen, että niiden tekijät ovat analysoitavien tuotteiden asiantuntijoita. Tämän lisäksi nämä henkilöt tarvitsevat riittävän koulutuksen sekä yleisesti luotettavuudesta että luotettavuustyökalujen käytöstä. Yleisen koulutuksen lisäksi tarvitaan muutama sellainen henkilö, jotka ovat kokeneempia luotettavuusanalyysien tekijöitä ja pystyvät ohjaamaan luotettavuusanalyysien teot. Koulutukseen liittyvistä harjoitusanalyyseistä saadaan kokemusta siitä, miten luotettavuusanalyysijä täytetään, arvostellaan ja mitä on odotettavissa. Kun on saatu luotettavuuskoulutus ja tehty jo aiemmin analyysijä, ajatellaan jo osin tiedostamattakin luotettavuutta.

Luotettavuusanalyysien pitäisi pysyä vertailukelpoisina ainakin saman projektin sisällä. Tämän takia yhteen projektiin liittyvien analyysien tekijöiden tulisi olla aina samoja. Tällöin riskien painotukset tulevat samanlaisiksi. Kuten tehdyistä vika- ja vaikutusanalyyseistä selviää, sama vika voi saada täysin erilaisia riskiluvun arvoja riippuen analyysien tekijöistä. Analyysien asiantuntijoiksi valitaan neljästä kuuteen mekaniikkasuunnittelijaa, jotka ovat mukana tuotteen tuotekehityksessä. Mukana on hyvä olla myös päämekaniikkasuunnittelija. Näin hän kuulee myös kaikki sellaiset asiat, jotka eivät päädy kirjalliseen analyysiin. Tarvittaessa mukaan tukemaan analyysin tekoa voi ottaa kokeneen sähkösuunnittelijan, takuiden kanssa toimivan henkilön tai huolto ja kunnossapidossa toimivan henkilön. Tällä pyritään siihen, että analyysiin saadaan myös sellaista tietoa, jota ei suunnittelijoilla välttämättä ole.

Tuotekehityksen tueksi on hyvä tehdä tarkistuslista, johon on kerätty tietoa edellisissä tuotteissa havaituista vioista. Myös ne mahdolliset viat, jotka ovat nousseet esille aiempien projektien vika- ja vaikutusanalyyseissä kirjataan listaan. Listaa täytetään myös asiantuntijoiden mielipiteillä. Tarkoituksena on päivittää listaa sitä mukaa, kun löydetään lisää mahdollisia vikaantumistapoja. Tämä tarkistuslista otetaan käyttöön heti tuotekehitysprojektin alussa ja sitä seurataan läpi koko projektin. Kun lista on käytössä heti alusta asti, tulee suunnittelussa huomioitua

asioita mitä ei yksittäinen suunnittelija muuten välttämättä huomaisi. Listan toimintaa tukee se, että sekä Wild Cowberryn että Tornadon FMEA:ssa esiintyy samoja mahdollisia vikoja. Ehdotus tarkistuslistan pohjasta on liitteessä 5.

Lohkokaavion avulla nähdään hyvin osioiden väliset yhteydet. Näiden kahden projektin analysoimisessa kaavioista ei ollut kuitenkaan juurikaan hyötyä, sillä kaikki osallistujat olivat olleet mukana suunnittelemassa tuotteita. Tuotteiden CAD-mallit tukivat analyysijä paremmin kuin niiden lohkokaaviot. Tietokoneella tehdystä mallista pystytään tarkastamaan nopeasti, helposti ja varmasti kuinka tuote on oikeasti suunniteltu. Konseptivaiheessa olevista malleista ei ollut täydellisiä malleja, mutta silti ne antoivat hyvän ajatuksen siitä, mihin suuntaan suunnittelu oli menossa. Lohkokaavioista ei saa hyvää käsitystä, millainen tuotteen rakenne oikeasti on, mutta siitä selviää eri osa-alueiden väliset yhteydet.

Teollisuuden siirtyessä kohti kansainvälisempää ja hajautetumpaa toimintaa, voi tuotekehityksessä olla järkevää hyödyntää Delfoi-metodia. Tällöin siis tarvittavat luotettavuusaineistot kerätään asiantuntijoilta ympäri maailmaa. Tällä tavoin voidaan tehdä esimerkiksi vika- ja vaikutusanalyysiä lähettämällä taulukot asiantuntijoille tai pienemmille ryhmille. Analyysiä täytetään iteroiden, kuten Delfoi-metodikin etenee. Tietotekniikkaa voidaan myös hyödyntää siten, että henkilöt ympäri maailmaa pääsevät lukemaan luotettavuustietokantoja.

## **6.5 Luotettavuustyökalujen käyttö tuotekehityksen eri vaiheissa**

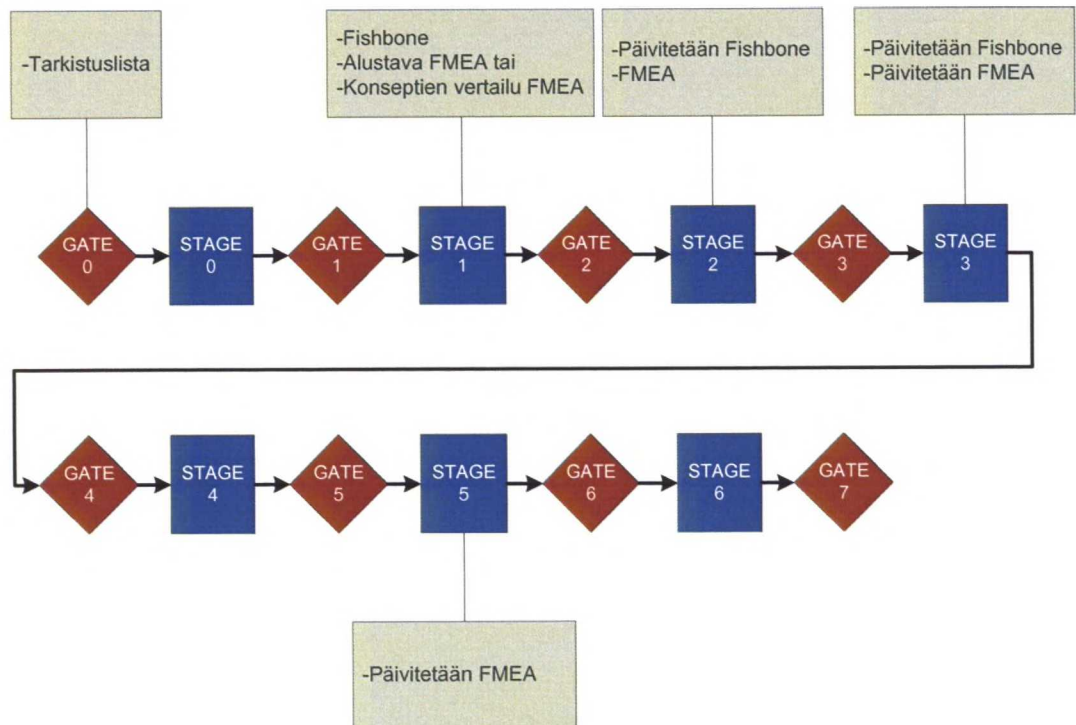
Tuotekehitysprojehtin alussa otetaan käyttöön tarkistuslista vanhoista vioista ja mahdollisista vikaantumistavoista. Tätä tarkistuslistaa hyödynnetään läpi koko projektin. Listalla on tarkoitus huomioida edellisissä tuotteissa olleita mahdollisia vikaantumistapoja ja näin estää niiden tuominen uuteen projektiin. Ensimmäinen kattava luotettavuusanalyysi tehdään kun on olemassa konsepti tai konsepteja, joiden luotettavuuksia vertaillaan. Tämä tapahtuu ennen Gate 2:ta, sillä tällöin voidaan vielä vaikuttaa konseptin valintaan. Konsepteista on hyvä olla olemassa jo suurpiirteiset tietokonemallit helpottamaan analyysin tekoa. Tässä vaiheessa tehdään syy-seuraus-kaavio, jonka ongelmaksi laitetaan: Taajuusmuuttaja vikaantuu. Kaavion tarkoituksena on avata analysoijien ajatuksia. Edellisen analyysin yhteydessä

tuotteelle tehdään myös vika- ja vaikutusanalyysi. Kuten työssä on todettu, vika- ja vaikutusanalyysin avulla voidaan projektin tässä vaiheessa vertailla erilaisia konsepteja.

Luotettavuustyökaluja käytetään toisen kerran ennen Gate 3:sta ja ennen ensimmäisen prototyypin valmistamista. Tällöin pystytään vielä vaikuttamaan osien suunnitteluun, eivätkä kustannukset nouse liian paljoa. Stage 2:ssa katsotaan ja tarvittaessa päivitetään jo tehtyä syy-seuraus-kaaviota. Ensimmäisessä vaiheessa tehtyä vika- ja vaikutusanalyysiä hyödyntäen tehdään Stage 2:ssa uusi analyysi nykyiselle tuotteelle. Tässä vaiheessa tehdystä vika- ja vaikutusanalyysistä tulee tarkempi ja todellisempi kuin konseptien vertailussa tehdystä, koska tällöin tuotteen rakenne on jo valmis.

Vika- ja vaikutusanalyysiä ja syy-seuraus-kaaviota päivitetään tarvittaessa alfa-pilotin kokemusten mukaan ennen Gate 4:ä. Vika- ja vaikutusanalyysiä päivitetään vielä kerran ennen Gate 6:ssa tapahtuvaa projektin sulkemista. Tämä siksi, että tutkittaessa vanhoja projekteja löydetään kattavasti kaikki mahdolliset viat. Analyysin päivittäminen ja sen kertaaminen voi myös antaa ideoita siitä miten kehittää tuotekehitysprojekteja, josta keskustellaan Gate 6:ssa. Kuvassa 6.1 esitetään luotettavuustyökalujen käyttöä tuotekehitysprojektissa.





**Kuva 6.1** Luotettavuustyökalujen käyttö tuotekehityksen eri vaiheissa

## 6.6 Tutkimuksen arvioiminen

Tämän tutkimuksen tavoitteet saavutettiin hyvin. Työn tuloksena saatiin valikoitua ne luotettavuustyökalut (tarkistuslista, syy-seuraus-analyysi ja vika- ja vaikutusanalyysi), joita suositellaan käytettäväksi mekaniikkasuunnittelussa. Kahden eri projektin analyysien avulla saatiin hyvä käsitys siitä, missä vaiheessa tuotekehitysprosessia ehdotettuja työkaluja kannattaa käyttää.

Analyysejä tehdessä olisi voinut ottaa mukaan asiantuntijaksi sähkösuunnittelijoiden tilalle tai lisäksi henkilöitä, joilla on enemmän kokemusta vikaantuneista taajuusmuuttajista. Tällä valinnalla analyysihin olisi voinut tulla mukaan erilaisia mahdollisia vikaantumisia, joita nyt löydettiin.

Tutkimuksessa tehtyjä analyysejä voidaan hyödyntää sellaisenaan projekteille tehtyjen ehdotusten mukaan. Tornadolle tehtiin Stage 1:en syy-seuraus-analyysi sekä konseptien vertailu vika- ja vaikutusanalyysillä. Seuraavaksi kyseiselle projektille pitäisi tehdä perusteellinen FMEA, kun tuotteen osia suunnitellaan Stage 2:ssa. Wild Cowberrylle tehdyt analyysit sopivat Stage 3:ssa tehtäviin analyysihin. Näillä analyysillä korvataan Stage 2:en tarkoitetut analyysit. Seuraavan kerran Wild

Cowberryn vika- ja vaikutusanalyysiä päivitetään vielä ennen Gate 6:n projektin lopettamista.

Jatkossa syy-seuraus-analyysillä voisi tutkia jotain positiivista tapahtumaa, kuten onnistunutta tai luotettavaa tuotekehitysprojektia. Näin voidaan löytää sellaisia ominaisuuksia, jotka tekevät suunnitteluprosessista luotettavampia. Tätä kautta voidaan siis pyrkiä luotettavampaan tuotteeseen. Luotettavuusanalyysien tekoa Delfoi-metodin avulla muiden maiden tuotekehitysosastojen kanssa on myös syytä tutkia. Tämä voi parantaa tuotteiden luotettavuutta. Lisäksi tällä tavoin voidaan saada kaikkien suunnittelijoiden tietoisuuteen sellaisia vikaantumismahdollisuuksia, joita on havaittu vain muissa maissa.

## 7 YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli tutustua luotettavuuteen ja luotettavuustyökaluihin tuotekehityksen mekaniikkasuunnittelun näkökulmasta. Tavoitteena oli löytää sopivia luotettavuustyökaluja kaapitetun taajuusmuuttajan mekaniikkasuunnitteluun. Lisäksi tavoitteena oli löytää parhaat vaiheet tuotekehitysprosessista, jolloin näitä valittuja luotettavuustyökaluja olisi optimaalisinta käyttää.

Tämä työ rajattiin Wind AC:n suunnittelemiin tuulivoimaan tarkoitettuihin kaapitettuihin taajuusmuuttajiin. Tutkimus tehtiin mekaniikkasuunnittelun tarpeiden mukaan. Työssä tutkitut luotettavuustyökalut rajoituivat laadullisiin tai puolimäärällisiin luotettavuustyökaluihin.

Luotettavuustyökaluja on lukemattomia ja näillä kaikilla ovat omat ominaisuudet. Työkalun valintaan vaikuttavat monet asiat, joista yksi tärkeimmistä on analyysin tarkoitus, eli mihin tuloksia on tarkoitus käyttää. Yleensä luotettavuustyökaluja on käytettävä useampaa, jotta tulokset ovat kattavia ja laadukkaita. On olemassa myös luotettavuusanalyysijä tukevia tekniikoita (esimerkiksi aivorihi ja Delfoi-metodi), joita voidaan käyttää tehokkuuden lisäämiseksi.

Tutkimuksen analyysit suoritettiin kahdelle eri projektille, jotka olivat eri vaiheissa tuotekehitysprosessia. Toinen projekteista, Tornado, oli konseptin suunnitteluvaiheessa ja toinen projekteista, Wild Cowberry, oli edennyt jo niin pitkälle, että siitä oli tehty prototyyppejä. Analyysit tehtiin näille kahdelle projektille, jotta saataisiin lisätieto siitä, miten luotettavuustyökalut sopivat kyseisiin vaiheisiin tuotekehitysprosessia. Analyysinä molemmille projekteille käytettiin syy-seuraus-, vika- ja vaikutus- sekä vikapuuanalyysijä.

Syy-seuraus-kaaviossa molemmille projekteille käytettiin samaa ongelmaa: Taajuusmuuttaja vikaantuu. Tämän takia molempiin kuvaajiin kirjattiin samoja syitä. Kuvaajat täyttyivät monipuolisesti erilaisilla mahdollisilla syillä. Vaikka syy-seuraus-kaavion käyttö vaikutti helpolta, löytyi silti molemmista kaavioista sellaisia syitä, jotka eivät olleet yksiselitteisiä. Siten nämä syyt eivät välittäneet sitä kaikkea sisältöä, mikä analyysin teossa sille annettiin. Hyvänä esimerkkinä on, että



asiakkaaksi ajateltiin itse asiakkaan lisäksi myös käyttäjä, projektin omistaja ja tuotteen ostaja, mutta kuvaajaan merkittiin ainoastaan asiakas.

Syy-seuraus-kaavion täyttö on hyvä tapa avata ajatuksia. Tällä työkalulla saadaan myös kattavasti syitä, koska syitä tarkastellaan kategorioittain. Syy-seuraus-kaavion tehokkuutta kuvastaa se, että suurin osa vika- ja vaikutusanalyysin syistä löytyi tehdyistä syy-seuraus-kaavioista. Tämä luotettavuustyökalu sopii hyvin tehtäväksi ennen muita luotettavuusanalyysijä. Syy-seuraus-kaavio ei yksinään riitä luotettavuustyökaluksi, vaan se vaatii aina käytettäväksi rinnalleen jonkun toisen analyysin.

Vika- ja vaikutusanalyysissä tutkittiin Tornadon eri konseptien luotettavuutta ja niiden mahdollisia vikaantumistapoja sekä Wild Cowberryn mahdollisia vikaantumistapoja. Mahdolliset vikaantumiset saivat analyyseissä riskilukuja kahden ja 336:n väliltä. Molemmista analyyseistä löytyi samoja vikoja, koska projektien rakenteet muistuttivat toisiaan.

Tornadon konseptien vertaileminen onnistui hyvin. Haastavaa vertailussa oli se, että konseptit eivät olleet vielä täysin valmiita, joten osa vioista sai huomattavan pieniä riskiluvun kertoimia. Konsepteista toinen vaikutti olevan selvästi luotettavampi. Toisaalta pienellä uudelleensuunnittelulla konseptien luotettavuudet olisivat kääntyneet toisinpäin. Konseptit siis analysoitiin hieman liian aikaisin.

Monet analyysien viat saivat riskiluvuiksi yli 100, vaikka ne eivät todellisuudessa olleet ehkä näin kriittisiä. Riskiluvultaan alle 100 jäi kuitenkin sellaisia vikoja, joiden kriittisyys oli täydet kymmenen. Näin kriittisiin vikoihin pitäisi aina puuttua. Yksi näistä oli Wild Cowberryn analyysissä esille noussut mahdollinen ihmisen loukkaantumisriski. Analyysissä sille muodostui riskiluvuksi vain kymmenen, joten pelkän riskiluvun mukaan se ei ole merkittävä riski. Tällaiset riskit pitäisi saada poistettua systeemistä kokonaan. On siis tärkeää, ettei mahdollisia vikaantumisia arvostella pelkkien riskilukujen mukaan, vaan tutkitaan myös kertoimet, joista se muodostuu.

Vika- ja vaikutusanalyysissä löytyi samanlaisia vikaantumismahdollisuuksia. Yksi näistä oli kiinnitysosien mahdollisuus tippua moduulin sisälle. Toisessa analyysissä tämä vikaantumismahdollisuus sai riskiluvuksi 120 ja toisessa 16 ja 72. Kyseessä oli samanlaiset vikaantumismahdollisuudet, joilla oli samat seuraukset. Tämä on hyvä esimerkki siitä, että riskiluvut riippuvat paljon analysoijista. Riskiluvun arvoihin vaikutti myös se, että sen kertoimet oli vaikea päättää, koska kertoimien valintaa helpottava teksti oli peräisin autoteollisuudesta. Tämän takia työssä tehtiin esitykset uusista arviointiasteikoista, jossa kuvastavat tekstit on tehty taajuusmuuttajiin liittyen. Kun asteikot ovat yksiselitteisempiä, analyysin teko nopeutuu ja analyysit ovat vertailukelpoisempia. Työssä tehtiin myös ehdotus uudesta analyysipohjasta, jonka tarkoituksena on helpottaa niin vika- ja vaikutusanalyysin tekoa kuin sen lukemista

Vikapuuanalyysit tehtiin sellaisille vioille, jotka saivat vika- ja vaikutusanalyysissä suuret riskiluvut. Tornadolle huipputapahtumaksi valikoitui kiinnitysosien tippumisesta moduulin sisälle johtuva oikosulku ja Wild Cowberrylle komponenttien kastuminen. Viat jakautuivat molemmissa kuvaajissa selkeästi muutamaan päähaaraan. Puukuvaajiin tuli monia perustapahtumia, joista useimmat johtuivat jotenkin ihmisestä. Tornadon kuvaajasta ainoastaan kaksi perusvikatapahtumaa ei johtunut ihmisestä.

Kummastakin kuvaajasta löytyi ainoastaan yksi ja-portti, mikä kuvastaa hyvin sitä, etteivät vikaantumistavat olleet kovinkaan monimutkaisia. Vikaantumismekanismit ovat mekaniikan kannalta yleisesti yksinkertaisia ja niitä voi olla monia. Vikapuuanalyysi soveltuu paremmin monimutkaisten vikojen tutkimiseen. Vaikka kuvaaja toimii hyvin, vikapuuanalyysi ei sovellu taajuusmuuttajan mekaniikkasuunnitteluun. Jos halutaan tutkia vika- ja vaikutusanalyysin vikoja tarkemmin, vikapuuanalyysin sijaan yksinkertaisissa tapauksissa voi olla järkevämpää käyttää syy-seuraus-kaaviota, sillä siihen saadaan lueteltua järjestelmällisesti vian mahdolliset syyt.

Tarkistuslista, johon kirjataan tuotteen mahdollisia vikoja ja asiantuntijoiden huomioita, olisi hyvä olla käytössä heti suunnittelun alusta alkaen. Listan käyttöä tukee se, että samoja vikoja löydettiin molempien projektien syy-seuraus-kuvaajista

ja vika- ja vaikutusanalyyseistä. Analyysien samat vikaantumismahdollisuudet johtuivat siitä, että tuotteiden rakenteet ovat samantyyppisiä. Käyttämällä tällaista tarkistuslistaa alusta alkaen, tunnistetaan mahdolliset viat jo ennen luotettavuusanalyysijä ja niihin voidaan siten reagoida jo konseptisuunnittelun alussa.

Luotettavuutta ei kuitenkaan saada nostettua pelkkien luotettavuustyökalujen avulla. Suunnittelijat tarvitsevat myös koulutusta liittyen luotettavuuteen ja luotettavuusanalyysihin. Kaikkien suunnittelijoiden täytyisi saada peruskoulutus ja muutamien suunnittelijoiden tulisi saada kattavampi koulutus, jotta he voisivat vastata luotettavuusanalyysien teosta. Koulutuksen avulla suunnittelu toimii tehokkaammin luotettavuuden näkökulmasta. Lisäksi luotettavuustyökalujen käyttö tehostuu ja tulokset voivat parantua.

Luotettavuusanalyysijä pitäisi saman projektin sisällä tehdä aina samoilla henkilöillä. Tällä tavoin analyysit pysyvät vertailukelpoisina, kun painotetaan vikoja samalla tavalla läpi projektin. Analyysien vertailun helpottamiseksi voidaan prosessissa hyödyntää vanhoista analyyseistä saatuja vikojen arvoja.

Tuotekehitysprosessin alussa pitäisi ottaa käyttöön tarkistuslista ja seurata sitä läpi koko projektin. Konseptinsuunnitteluvaiheessa konseptien vertailu aloitetaan tekemällä syy-seuraus-kaavio taajuusmuuttajan vikaantumisesta. Konseptien varsinainen vertailu suoritetaan vika- ja vaikutusanalyysillä. Syy-seuraus-analyysi pitäisi aina käydä läpi ennen muita analyysejä ja tarvittaessa päivittää se havaituilla syillä. Perusteellinen vika- ja vaikutusanalyysi tehdään, kun tuotetta suunnitellaan osien tarkkuudella ennen prototyypin valmistamista. Näitä kahta tehtyä analyysiä päivitetään prototyypeistä saatujen tietojen perusteella. Viimeisen kerran analyysejä päivitetään ennen kuin tuotekehitysprojekti päätetään.



## LÄHDELUETTELO

ABB. 2007. ACS800 Hardware Manual ACS800-77LC Wind Turbine Drives (840 to 3180 kW)

ABB. 2009. System Description and Start-up Guide ACS800-77LC Wind Turbine Drive (Back-to-back) -käyttöopas.

Birolini, A. 2007. Reliability Engineering Theory and Practice. 5. painos. New York. Springer Berlin Heidelberg. 593 s. ISBN 978-3-540-49388-4

Harju, H. & Koskela, M. 2003. Kustannustehokas ohjelmiston luotettavuuden suunnittelu ja arviointi Osa 2. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 107 s. ISBN 951-38-6136-8

Haverila, M. et al. 2005. Teollisuustalous. 5. painos. Tampere. Infacs johtamistekniikka oy. 509 s. ISBN-13: 978-951-96765-5-5

IEC/ISO 31010. 2009. Risk management – Risk assessment techniques. 187 s.

IEC 60529. 2001. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). 2.1 painos. 47 s.

IEC 60812. 2006. Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis. 2. painos. 47 s.

IEC 61025. 2006. Fault tree analysis (FTA). 2. painos. 52 s.

IEC 61078. 2006. Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram and Boolean methods. 2. painos. 73 s.

IEC 61703. 2001. Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms. 103 s.

IEC 62508. 2010. Guidance on human aspects of dependability. 50 s.

Kallio, O. 2008. Taajuusmuuttajakoulutus: Taajuusmuuttajan toimintakoulutusmateriaali. 30.4.2008. ABB Oy Drives

Kangas, K. 2005. ELMAS –vikapuutyökalun käyttö Drivesissa -koulutusmateriaali. 1.12.2005. ABB Oy Drives

Kececioglu, D. 1991. Reliability Engineering Handbook volume 2. New Jersey. Prentice-Hall, Inc. 541 s. ISBN 0-13-772302-4

Kirrmann, H. 2005. Fault Tolerant Computing in Industrial Automation. 2. painos. Baden. ABB Research Center. 201 s.

Koivula, T. et al. 2006. Vikapuuanalyysillä vian alkulähteille. Kunnossapitolehti. nro. 2/2006. s. 64–66. ISSN 0784-1787

Laatuakatemian kotisivut. saatavissa: <http://www.kotiposti.net/tuurala/PDCA.htm>. viitattu 2.6.2010

Lähteenmäki, M. & Leiviskä, K. Tilastollinen prosessinohjaus: perusteet ja menetelmät, Raportti B No 8. 1998. Oulun Yliopisto Sääntötekniikan laboratorio. 33 s. ISBN 951-42-5064-8

NASA Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology:n kotisivut. saatavissa: <http://parts.jpl.nasa.gov/organization/group-5141/parts-technology/qualification-methodologies/>. viitattu 10.8.2010

Oberschmid, H. & Stugger, A. 2009 Creativity Techniques -kurssin luentomateriaali, Graz University of Technology.

O'Connor, P. 1995. Practical reliability engineering. 3. Painos. Englanti. John Wiley & Sons Ltd. 431 s. ISBN 0-471-96025-X

Product Development Institute Inc:n kotisivut. saatavissa: <http://www.prod-dev.com/stage-gate.php>. viitattu: 10.6.2010

SFS-EN 60300-1. 2004. Luotettavuuden hallinta. Osa 1: Luotettavuuden hallintajärjestelmät. 2. painos. 30 s.

SFS-EN 60300-3-9. 2000. Luotettavuusjohtaminen osa 3: Käyttöopas. Luku 9: Teknisten järjestelmien riskianalyysi. 47 s.

SFS-EN ISO 9000. 2005. Laadunhallintajärjestelmät. Perusteet ja sanasto. 2. painos. 70 s.

SFS-EN ISO 9004. 2009. Organisaation johtaminen jatkuvaan menestykseen. Laadunhallintaan perustuva toimintamalli. 3. painos. 83 s.

SFS-IEC 50(191). 1996. Sähkötekniillinen sanasto. Luotettavuus ja palvelun laatu. 3. painos. 143 s.

Salomäki, R. 2003. Suorituskykyiset prosessit – Hyödynnä SPC. 2. painos. Tampere. Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET. 424 s. ISBN 951-817-802-X

Stage-Gate International:in kotisivut. saatavissa: [http://www.stage-gate.com/knowledge\\_pipwhat.php](http://www.stage-gate.com/knowledge_pipwhat.php). viitattu: 10.6.2010

Stamatis, D. H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. Wisconsin ASQC Quality Press. 482 s. ISBN 0-87389-300-X

Virtanen, S. 2004. Vikojen perässä juoksemisesta riskienhallintaan, [www.laatukeskus.fi](http://www.laatukeskus.fi):n Exba-verkkolehti, nro. 1/2004, s. 21–22

Yang, G. 2007. Life Cycle Reliability Engineering. New Jersey. John Wiley & Sons Inc. 517 s. ISBN 978-0-471-71529-0

Yli-Juuti, J. 2010. Product Creation VAKKA Gate Model -koulutusmateriaali 29.4.2010. ABB Oy Drives.

Quality tools:in kotisivut. saatavissa: [http://syque.com/quality\\_tools/toolbook/FTA/how.htm](http://syque.com/quality_tools/toolbook/FTA/how.htm), viitattu 1.6.2010



## LIITTEET

### Liite 1 Luotettavuustyökalun valintaan vaikuttavat tekijät

**Taulukko 1** Luotettavuustyökalut ja niiden metodit (muokattu) (IEC/ISO 31010 2009, s. 22)

Luotettavuustyökalu ja metodi	Riskin tunnistaminen	Seurauksien tunnistaminen	Todennäköisyyksien tunnistaminen	Riskin taso	Riskin arviointi
Aivoriihi	SH	ES	ES	ES	ES
Delfoi-metodi	SH	ES	ES	ES	ES
Syy- ja seurauskaavio	SH	SH	ES	ES	ES
Tarkistuslista	SH	ES	ES	ES	ES
Vika- ja vaikutus analyysi	SH	SH	SH	SH	SH
Vikapuuanalyysi	S	ES	SH	S	S
SH = Soveltuu hyvin, S = Soveltuu, ES = Ei sovellu					

**Taulukko 2** Luotettavuustyökalut (muokattu) (IEC/ISO 31010 2009, s. 23 – 26)

Luotettavuustyökalu	Analyysityyppi	Resurssit	Epävarmuus	Monimutkaisuus	Voidaan saada määrällinen tulos
Delfoi-metodi	Tukeva	Keskinkertainen	Keskinkertainen	Keskinkertainen	Ei
Syy- ja seurausanalyysi	Skenaario	Vähäinen	Vähäinen	Vähäinen	Ei
Tarkistuslista	Etsivä	Vähäinen	Vähäinen	Vähäinen	Ei
Vikapuuanalyysi	Skenaario	Korkea	Korkea	Keskinkertainen	Kyllä
Vika- ja vaikutusanalyysi	Toiminnallinen	Keskinkertainen	Keskinkertainen	Keskinkertainen	Kyllä

## Liite 2 Taulukot RPN:n kertoimista

**Taulukko 1** ABB:n nykyinen riskin kriittisyysasteikko

KRIITTISYYS		
Arvo	Kriteeri: Vian vaikutuksen kriittisyys	Luokka
Hyvin korkea	Indikoi potentiaalisesta vikamuodosta joka voi aiheuttaa täydellisen epätoimivuuden (9 jos tutkittava kokonaisuus varoittaa ongelmasta, 10 jos ei varoitusta).	10
		9
Korkea	Suuri asiakkaan epäytyväisyys vian takia, kuten pääsysteemin (esim. auton moottori) toimimattomuus.	8
Korkeasta keskinkertaiseen	Voi olla epätoimivuutta mukavuus systeemissä (esim. ilmastointi). Ei vaikuta turvallisuus näkökulmiin.	7
Keskinkertainen	Vika aiheuttaa asiakastytymättömyyttä.	6
Keskinkertaisesta matalaan	Asiakas tuntee epäytyväisyyttä tai ärsyyntyy vian takia.	5
Matala	Asiakas huomaa jonkinasteista alisysteemin tai suorituksen huonontumista.	4
Matalasta vähäiseen	Vika aiheuttaa vain hiukan epämukavuutta. Asiakas huomaa todennäköisesti vain hiukan suorituksen huonontumista.	3
Vähäinen	On epätodennäköistä, että vian vähäisen luonteen johdosta systeemin suoritustaso laskisi.	2
Hyvin vähäinen	Useat asiakkaat eivät todennäköisesti huomaa mitään vikaa.	1

Taulukko 2 ABB:n nykyinen riskin todennäköisyysasteikko

TODENNÄKÖISYYS				
Vikataajuus	Vian todennäköisyys	Luokka	Todennäköisyys / aikayksikkö [tunti]	Todennäköisyys per aikayksikkö [%]
Hyvin suuri	Vika tapahtuu melkein väistämättömästi.	10	1 in 2	50,00 %
		9	1 in 3	33,33 %
Suuri	Toistuvia vikoja.	8	1 in 8	12,50 %
		7	1 in 20	5,00 %
Keskinkertainen	Satunnaisia vikoja.	6	1 in 80	1,25 %
		5	1 in 400	0,25 %
		4	1 in 2000	0,050 %
Matala	Suhteellisen vähän vikoja.	3	1 in 15000	0,0067 %
		2	1 in 150 000	0,0007 %
Vähäinen	Vika on epätodennäköinen.	1	1 in 1 500 000	0,0001 %



**Taulukko 3** ABB:n nykyinen riskin havaittavuusasteikko

HAVAITTAVUUS		
Arvo	Ohje	Luokka
Ei havaita	Seulonta ei voi havaita potentiaalista vikamekanismia, tai ei ole olemassa seulontaa.	10
Hyvin matala	Seulonta ei voi todennäköisesti havaita potentiaalista vikamekanismia.	9
Matala	Seulonta ei ehkä havaitse potentiaalista vikamekanismia.	8
		7
Keskinkertainen	Seulonta voi havaita potentiaalisen vikamekanismin.	6
		5
Suuri	Seulonnalla on hyvä mahdollisuus havaita potentiaalinen vikamekanismi.	4
		3
Hyvin suuri	Seulonnalla havaitaan hyvin todennäköisesti potentiaalinen vikamekanismi.	2
		1

**Taulukko 4** ABB:n nykyinen riskin riskilukuasteikko

RPN	
Luokka	Ohje
1 < RPN < 18	Vähäinen tuote ja/tai kaupallinen riski.
18 < RPN < 64	Keskinkertainen riski. Tämä vaatii valitsevaa suunnittelun ja/tai prosessin tuotevalidointia ja arviointia RPN -arvon pienentämiseksi.
64 < RPN	Merkittävä riski. Vaatii laajaa suunnittelun ja/tai prosessin arviointia RPN -arvon pienentämiseksi.









